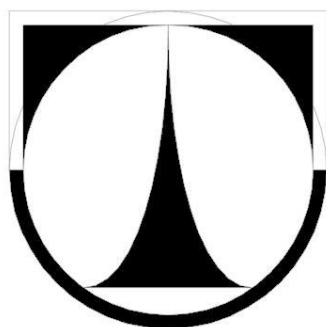


# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a  
mezioborových studií



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 - Elektronické informační a řídicí systémy

## **Analýza životnosti a stárnutí svítivých diod**

## **Analysis of lifetime and aging of LED**

### **Bakalářská práce**

Autor:

**Iveta Sikorová**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lubomír Slavík

Konzultant:

Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

V Liberci 17. května 2011

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Ústav řízení systémů a spolehlivosti

## Zadání bakalářské práce

<b>Příjmení a jméno studenta, (osobní číslo - nepovinné)</b>	<b>SIKOROVÁ Iveta</b>
<b>Datum zadání práce</b>	1.10. 2010
<b>Plánované datum odevzdání</b>	květen 2011
<b>Rozsah grafických prací</b>	Dle potřeby dokumentace
<b>Rozsah průvodní zprávy</b>	cca 30 stran
<b>Název práce (česky)</b>	Analýza životnosti a stárnutí svítivých diod
<b>Název práce (anglicky)</b>	Analysis of lifetime and aging of LED
<b>Zásady pro vypracování BP:</b>	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Prostudujte teorii svítivých diod</li><li>2. Navrhněte metodiku testování svítivých diod z hlediska životnosti a stárnutí při trvalém a pulzním zatížení</li><li>3. Realizujte přípravky pro testování svítivosti LED</li><li>4. Proveďte dlouhodobé měření na statisticky prokazatelném vzorku LED</li></ol>	
<b>Seznam odborné literatury:</b>	
<p>[1] Doleček, J.: Moderní učebnice elektroniky - 3.díl Optoelektronika, BEN 2005, ISBN 80-7300-184-5</p> <p>[2] Frohn, M. &amp; kol.: Elektronika - polovodičové součástky a základní zapojení, BEN, Praha 2006, ISBN 80-7300-123-3</p> <p>[3] <a href="http://www.avagotech.com">http://www.avagotech.com</a></p>	
Ing. Lubomír Slavík	Ing. Lubomír Slavík
<b>Konzultant BP/DP</b>	Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

## **Prohlášení**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tom případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 17. května 2011

Podpis:

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěla poděkovat Ing. Lubomíru Slavíkovi, Ing. Miroslavu Novákovi Ph.D. a Ing. Jiřímu Jelínkovi Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, připomínky a za poskytnutí informačního a technického zázemí.

## **Abstrakt**

Tématem této bakalářské práce je analýza životnosti a stárnutí svítivých diod (LED). Cílem práce je zachytit projevy stárnutí (snižování svítivosti) u dodaných svítílen firmy Applic a samostatných barevných výkonových LED, a tím určit jejich životnost při pulzním a statickém zatížení.

Měření bylo prováděno luxmetrem firmy Lutron LX 1108 v černé komoře, kde vzdálenost čidla luxmetru od LED byla 12 cm při okolní teplotě  $(22 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . Pro napájení samostatných výkonových LED byl použit proudový zdroj vlastní konstrukce a pro svítilny firmy Applic napěťový zdroj. Pro měření LED v pulzním režimu byl vyvinut přípravek pro cyklické zapínání výkonového buzení.

V závěru práce je relativní úbytek svítivosti LED prezentován grafickou formou a u barevných výkonových LED jsou výsledky porovnány s katalogovými údaji a u svítílen LED firmy Applic je vyhodnocen vliv elektroniky na svítivost v pulzním režimu.

### **Klíčová slova**

svítivost, stárnutí LED, životnost LED

## **Abstract**

The main theme of bachelor thesis is analysis lifetime and of aging of light emitting diodes (LED). The aim is catching symptoms of aging by delivered lamps from Applic company and by colour power LED by continuous and pulsed regime.

Measurement was executed by luxmeter Lutron LX 1108 in black box and distance between sensor and luxmeter was 12 cm and ambient temperature was  $(22 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . Discrete colour LED was powered by current source (constructed for this occasion) and lamps of Applic company was powered by voltage source. Special tool was made for alternate switching of power source.

Decrease of luminous intensity was graphically evaluated at the end and results are compared with catalogue data. Influence of control electronics to this decrease was analyzed on lamps from Applic company.

### **Key words**

luminous intensity, LED aging, lifetime of LED

# Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Abstrakt.....	5
Abstract.....	6
Obsah .....	7
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek .....	10
Seznam grafů .....	11
Úvod.....	12
1. Životnost, stárnutí a ztráty na světelné účinnosti LED.....	14
1.1 Teoretické předpoklady, teplota chromatičnosti, CRI .....	14
1.2 Výkonová LED .....	15
1.3 Životnost LED.....	16
1.4 Ztráty na světelné účinnosti LED.....	17
2. Princip činnosti LED .....	20
3. Světelný tok, intenzita osvětlení, svítivost .....	23
4. Výroba přípravků a úprava svítílen .....	25
5. Vyhodnocení naměřených dat .....	34
5.1 Praktická ukázka vyhodnocování dat.....	34
5.2 Rozdíl mezi hodnotami naměřenými a udávanými výrobcem.....	36
5.3 Volt-ampérová charakteristika .....	38
5.4 Stárnutí blikajících LED .....	40
5.5 Stárnutí trvale svítících LED.....	41
5.6 Stárnutí svítílen firmy Applic.....	42
5.7 Teplotní závislost .....	44



Závěr .....	46
Seznam použité literatury .....	47
Obsah přiloženého CD .....	49
Příloha a – schéma zapojení přípravku pro pulzní zatěžování.....	50
Příloha B – Tabulky blikajících LED .....	51
Příloha C – Tabulky trvale svítících LED .....	53
Příloha D – Tabulka teplotní závislosti.....	54
Příloha E – Tabulky volt-ampérové charakteristiky .....	55
Příloha F – Grafy V-A charakteristiky a $F = f(I)$ .....	56
Příloha G – Tolerance luxmetru firmy Lutron LX 1108 .....	59

## Seznam obrázků

Obr. 1: Teplota chromatičnosti .....	14
Obr. 2: Jednoduché LED svítidlo .....	16
Obr. 3: Dioda nepřipojená ke zdroji [2].....	20
Obr. 4: Dioda v závěrném směru [2] .....	21
Obr. 5: Dioda v propustném směru [2] .....	21
Obr. 6: Tok proudu diodou [2].....	22
Obr. 7: Steradián [3] .....	23
Obr. 8: Intenzita osvětlení [4] .....	24
Obr. 9: Vyzařovací diagram [5] .....	24
Obr. 10: Svítílny před upravením .....	25
Obr. 11: Úprava svítílen fy Applic .....	26
Obr. 12: Svítilna firmy Applic .....	27
Obr. 13: Plánované využití přípravků fy Applic v průmyslu .....	27
Obr. 14: Blokové schéma „blikacího přípravku“ .....	28
Obr. 15: Generátor impulzů a čítač.....	29
Obr. 16: Jeden kanál výkonové části přípravku – proudový zdroj a spínač .....	30
Obr. 17: Realizace destičky na blikání .....	31
Obr. 18: Přípravek pro statické zatěžování a) 700 mA b) 500 mA .....	32
Obr. 19: Dřevěné temné komory .....	33
Obr. 20: Znázornění výpočtu světelného toku (lm).....	34

## Seznam tabulek

Tab. 1: Blikající LED.....	36
Tab. 2: Trvale svítící LED .....	36
Tab. 3: Volt-ampérová charakteristika LED teplá bílá.....	37

## Seznam grafů

Graf 1: Závislost relativní svítivosti na teplotě přechodu pro žlutou, červenou a oranžovou LED [1].....	18
Graf 2: Závislost relativní svítivosti na teplotě přechodu pro modrou, zelenou a bílou LED [1].....	18
Graf 3: Změna vyzařovaného toku v závislosti na úhlu [6].....	35
Graf 4: Černě zobrazena citlivost použitého luxmetru .....	38
Graf 5: Volt-ampérová charakteristika červené a teple bílé LED .....	39
Graf 6: Závislost relativního světelného toku v procentech na proudu .....	39
Graf 7: Relativní pokles svítivosti u blikajících LED teplá bílá a červená.....	40
Graf 8: Relativní pokles svítivosti u blikajících LED zelená a oranžová.....	41
Graf 9: Relativní pokles svítivosti u trvale svítících LED teplá bílá a červená.....	41
Graf 10: Relativní pokles svítivosti u trvale svítících LED zelená a oranžová .....	42
Graf 11: Pokles intenzity osvětlení u svítílen firmy Applic barvy bílé .....	42
Graf 12: Pokles intenzity osvětlení u svítílen firmy Applic barvy červené Č2, Č3 .....	43
Graf 13: Pokles intenzity osvětlení u svítílen firmy Applic barvy červené Č6, Č7 .....	43
Graf 14: Relativní svítivosti svítílen firmy Applic barvy bílé .....	44
Graf 15: Relativní svítivosti svítílen firmy Applic barvy červené.....	44
Graf 16: Teplotní závislost bílé LED a bílé svítílny .....	45
Graf 17: Teplotní závislost červené LED a červené svítílny .....	45

# Úvod

Dnešní doba stále více prosazuje jako světelné zdroje svítivé diody (Light Emitting Diode - dále jen LED). Dlouho používané žárovky se tak pomalu vytrácejí z obchodů. Hlavním důvodem je jejich nízká životnost. Žárovka má během svého života skoro konstantní světelný výstup, ale její konec přijde náhle. Zářící vlákna vypaří v průběhu 1000 hodin provozu wolframové částice a to se projeví snížením světelného výkonu o 10 – 15 % oproti počáteční hodnotě světelného toku. V rozsáhlých osvětlovacích soustavách, kde jsou použity žárovky, je ztráta kterékoliv z nich kritická, snižuje se tím totiž světelný výkon celé soustavy.

Na rozdíl od žárovek jsou LED v tomto ohledu předvídatelnější. Nemají totiž sklon náhle přestat svítit, spíše se během jejich života světelný výkon postupně snižuje. Přitom je jejich životnost extrémně dlouhá, někdy delší než příslušenství, ve kterém je LED implementována. Užitečná doba svícení je okolo 50 000 hodin, kdy světelný výkon je ještě vyšší než 70%.

Kde se LED vyskytují? Velkým trendem je umisťovat LED do osvětlovacích soustav interiérů (LED žárovky, LED zářivky, LED bodovky), používat je jako dekorativní podsvícení díky jejich barevné rozmanitosti (LED pásy, LED podhledy, LED podlahové). Nacházíme je i ve venkovním osvětlení zahrad či k osvětlení schodišť nebo jako nouzové osvětlení (LED reflektory). Najdeme je také v automobilovém průmyslu a dopravě, tam se používají pro zobrazování rychlosti nebo měnící se značení na tunelech (LED pouliční světla). Mají signalizační i informativní účel, například u osvětlení reklam. Využití LED se stále rozšiřuje, také díky svému úzkému úhlu vyzařování a dlouhé životnosti, rovněž úspora energie je nezanedbatelná. V neposlední řadě je důvodem přechodu na LED osvětlení zavazující legislativa Evropské unie ke snižování energetické náročnosti a zátěže životního prostředí. Vznikají výrobky, jako je například LED televize.

V první kapitole jsou rozebrány základní pojmy, jako je životnost, stárnutí svítivých diod, ztráty na světelné účinnosti LED, teplota chromatičnosti a CRI. Druhá kapitola se zabývá principem činnosti LED. Ve třetí kapitole je rozvedena teorie o světelném toku, intenzitě osvětlení a svítivosti. Obsahem čtvrté kapitoly je výroba přípravků a úprava svítilen. Pátá kapitola je zaměřena na vyhodnocení naměřených dat. Poslední kapitolou je závěr, kde jsou shrnuty dosažené výsledky.

Podnět k práci dala firma Applic, která poskytla k měření mimo samostatných výkonový LED i svítidly s osazenými LED. Hlavní důraz byl kladen na co nejdelší čas měření, přičemž firmu zajímá pouze relativní úbytek svítivosti v průběhu pulzního a trvalého zatěžování.

# 1. Životnost, stárnutí a ztráty na světelné účinnosti LED

## 1.1 Teoretické předpoklady, teplota chromatičnosti, CRI

LED diody jsou světelný zdroj dneška i zítřka. Zkratka LED znamená v angličtině „light emitted diode“ tedy česky „světlo emitující dioda“. Už název napovídá, že se jedná o polovodičový přechod P-N podobný jako v běžné diodě. Z materiálu přechodu se uvolňují fotony a tím vzniká světlo. Čip (polovodičový přechod diody) je většinou u obyčejných LED tvořen GaP (Galium-fosforid) nebo GaAsP (Galium-arsenid fosforid).

U výkonových diod se jako základní materiál používá materiál na bázi GaN (Galium-nitrid), případně InGaN (Indium-galium nitrid). Pro optimalizaci barevného podání bývá povrch LED čipu pokryt tenkou vrstvou luminoforu, což je látka měnící vlnovou délku vyzařovaného světla a tím i jeho barevné podání.

Výkonové LED (Hight Power LED) jsou diody o příkonu 1 W i více. Svítivost těchto diod se pohybuje až na 110 lumenech na watt. Svítidla osazená výkonovými LED jsou schopny poskytnout nejen dostatek světla, ale i světlo bílé barvy požadované barevné teploty nebo barevné světlo.

LED jsou vyráběny v barvách červené, zelené, modré, žluté a bílé. Jas diod lze plynule měnit díky tomu je možné kombinací červené (Red), zelené (Green) a modré (Blue) namíchat jakoukoli barvu tzv. režim RGB.

Zvláštní skupinu tvoří diody vyzařující bílé světlo. Zde je možnost dosáhnout jakékoliv barevné teploty světla (chromatičnost světla) od 2 000 K do 7 000 K a simulovat tak denní světlo i nažloutlé světlo svíčky.

Teplota chromatičnosti se udává v Kelvinech. Tento parametr vyjadřuje barevné vnímání světla, kdy hodnota kolem 2 700 K – 3 500 K reprezentujete teplé bílé světlo, které odpovídá světlu vyzařovanému klasickými žárovkami – jasné, mírně nažloutlé světlo. Teplota chromatičnosti s hodnotou 4 000 K představuje neutrální studené světlo, hodnota kolem 5 000 K představuje denní bílé světlo, hodnota nad 6 500 K reprezentuje studené bílé světlo, které je při hodnotách kolem 8 000 K vnímáno až jako slabě namodralé.



Obr. 1: Teplota chromatičnosti

Dalším parametrem, který souvisí s teplotou chromatičnosti a je také udáván v katalogovém listu je CRI (color rendering index) neboli index podání barev pro jednotlivé typy světelných zdrojů. Hodnota je vyjadřována v procentech, kdy 100 % udává naprosto věrné podání barev při použití referenčního zdroje světla (světlo klasické žárovky pro nižší hodnoty teploty chromatičnosti, denní bílé světlo pro vyšší hodnoty teploty chromatičnosti). U LED zdrojů světla se hodnota CRI pohybuje nad hranicí 70 % (70 – 90 %). V některých případech je index podání barev také označován zkratkou Ra.

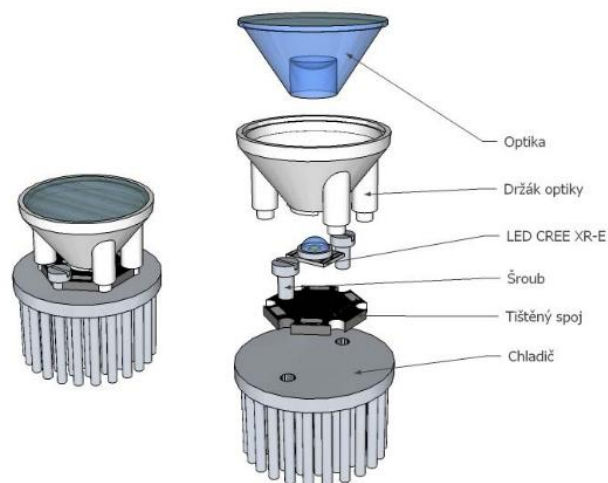
LED potřebují ke své činnosti napětí mírně přesahující 3V, nejčastěji se zapojují do série. Diodou musí téct omezený proud, aby nedošlo ke zničení polovodičového přechodu. Různé barvy LED mají různý úbytek napětí. Úbytek napětí LED je zároveň minimální napětí, které LED dioda potřebuje k funkci (svitu).

## **1.2 Výkonová LED**

Výkonová dioda svítí nejčastěji pod úhlem cca 100 – 120°, ale pomocí externí optiky, která se osazuje přímo na diodu, je možné dosáhnout libovolného úhlu, až do pouhých 8°. Rovněž vyzařovací úhel nemusí být jen kruhový, ale i elipsový či obdélníkový.

Na rozdíl od „obyčejných ledek“ se výkonové LED vyrábějí výhradně v provedení SMD. Důvodem je skutečnost, že je nezbytné zajistit jejich chlazení. Z tohoto důvodu se rovněž osazují na hliníkový plošný spoj. Na tištěné spoje se LED instalují nejen po jedné diodě, ale i ve skupinách, nejčastěji v počtech dělitelných třemi. Samotný hliníkový tištěný spoj však na uchlazení výkonových LED nepostačuje, ten slouží pouze k odvodu tepla od čipu LED. V řadě případů je chladič současně i korpusem svítidla.





*Obr. 2: Jednoduché LED svítidlo*

Teplota, která je v místě, kde je dioda připevněna k nosné podložce (tištěnému spoji) se nazývá teplota přechodu. Udržení této teploty na co nejnížší hodnotě je klíčovým prvkem ovlivňujícím světelné parametry a životnost LED svítidla. Teplota na diodě je ovlivňována především těmito třemi faktory:

- procházejícím proudem,
- provedením systému pro odvod tepla,
- teplotou okolního prostředí.

Obecně platí, že čím větší je procházející proud, tím větší je teplo vznikající v polovodičovém přechodu a tím pádem se také zvyšují požadavky na množství odváděného tepla. Toto množství je limitováno teplotou okolního prostředí a technickým provedením systému pro odvod tepla. Udržení provozní teploty LED pod kritickou teplotou je základním předpokladem pro jejich správnou a dlouhodobě bezproblémovou funkci. Zvýšená teplota vede ke snížení světelného výkonu LED a ke zkrácení její životnosti. V porovnání se zářivkou pokles teploty pod nulu není pro LED žádný problém, naopak se světelné parametry ještě zlepšují.

### **1.3 Životnost LED**

Vlastní životnost LED je za ideálních podmínek nejméně 100 000 hodin. Vliv teploty však tuto hranici posouvá stále níž. Polovodičový přechod mění s teplotou své elektrické vlastnosti, a pokud napájecí zdroj neumí tyto změny kompenzovat, dojde ke zničení LED. Reálná životnost LED svítidel se pohybuje okolo 50 000 hodin. Z důvodu, že úplná porucha diody je velice málo pravděpodobná, je životnost LED odvozována od poklesu jejich světelného toku v čase. Obecně se předpokládá, že životnost LED je

ukončena při poklesu světelného toku o 30 %, což odpovídá výše zmiňované životnosti. Výzkum, totiž ukázal, že většina lidí ani nezaregistruje pokles svítivosti o 30 % a to zejména v případě, že snížení je postupné.

Pro přepočet životnosti na roky je určující kolik hodin denně bude světelný zdroj v provozu. Při využití:

- 24 hodin denně – 5,7 roku,
- 12 hodin denně – 11,4 roku,
- 8 hodin denně – 17,1 roku.

Obecně lze říct, že životnost je bod, ve kterém světelný výstup je snížen na 70% počátečního světelného toku v lumenech (někdy označováno jako L70) pro veřejné osvětlení a 50% (L50) pro LED na dekorativní účely.

Testování životnosti LED je z jejich plnohodnotného života (ze vzorku polovina selže = průměrná životnost) dost nepraktické, kvůli jejich dlouho očekávaným životnostem. Nepřetržitý provoz zkoušení LED s předpokládanou životností 50 000 hodin bude trvat 5,7 roků. Protože technologie se stále vyvíjí a to dost rychle, produkty by zastaraly v době, kdy by skončilo testování. Proto se používá metoda, kde se provede zatížení na 1 000 hodin, při jmenovitém proudu a napětí. Toto je nutné, protože se světelný výkon skutečně zvyšuje prvních 1 000 hodin provozu pro většinu LED. Poté je LED zatížena na dalších 5 000 hodin. Výstupní záření se měří na 1 000 hodin provozu, což je normalizováno na 100%. Měření mezi 1 000 a 6 000 hodinami se porovnává s prvními 1 000 hodinami.

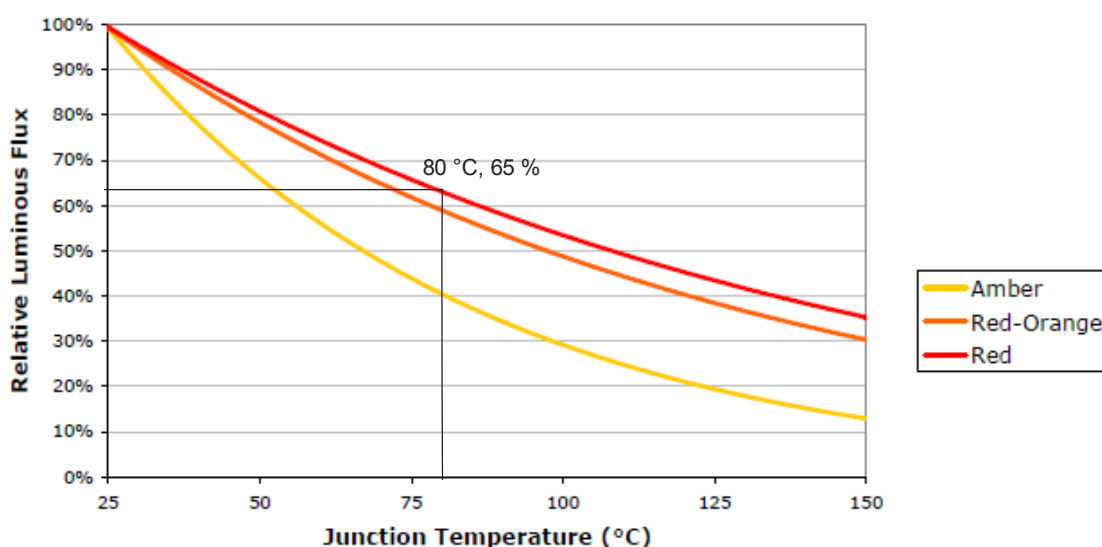
#### **1.4 Ztráty na světelné účinnosti LED**

Můžeme je rozdělit do tří kategorií a to na ztráty optické, tepelnou a elektrické. Každé z těchto tří kategorií lze dále členit a každá svým dílem přispívá ke zhoršení výsledného světelného toku.

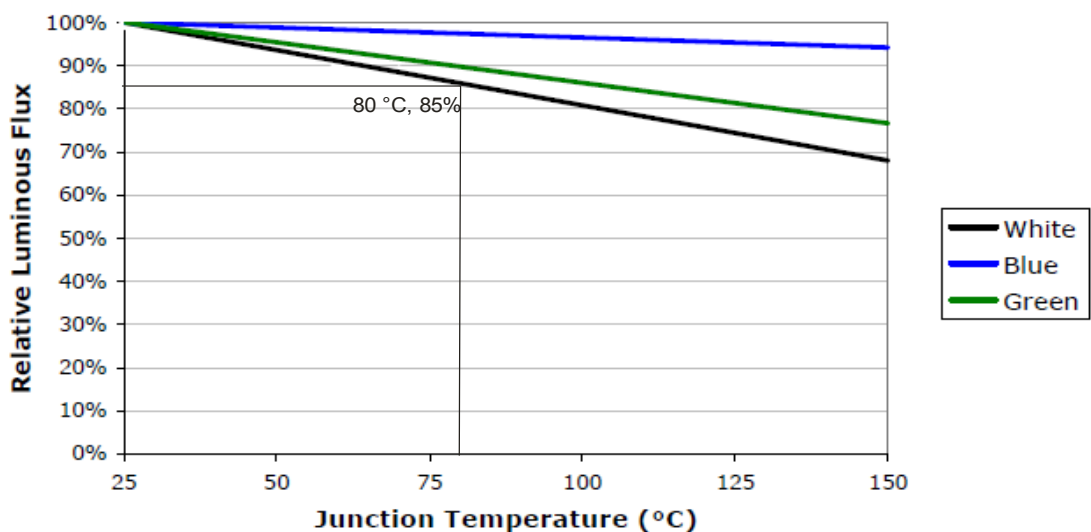
**Ztráty optické** vznikají ze dvou důvodů a tou je přídavná optika a světelná ztráta uvnitř svítidla. Pod pojmem přídavná optika je myšlen, jakýkoli optický systém, který není součástí LED. Tedy v případě svítílen připevněné plexisklo. Není sice určeno ke tvarování světelného kužele jako např. čočka, ale dochází v něm k lomu paprsků. Světelná ztráta uvnitř světla nastává, pokud se paprsky ze zdroje nejdříve odráží od svítidla, než dopadnou na plochu, kterou mají osvětlit. V případě LED je tato ztráta daleko menší než u všesměrového svítidla např. zářivky.

**Ztráta tepelná**, dochází k ní tehdy, když s rostoucí teplotou polovodičového přechodu ( $T_j$ ), klesá světelný tok LED. Většina katalogových listů uvádí světelný tok pro  $T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ale ve většině aplikací je tato teplota vyšší. U svítidel fy Applic by teplota polovodičového přechodu neměla přesáhnout  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  v případě, že budou v praxi použity v hale. LED Cree XR-C (červená) a XR-E (teple bílá) nabízejí svítivost 70% počáteční hodnoty po 50 000 hodinách provozu, za předpokladu že teplota přechodu je maximálně  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Proto stanovíme maximální povolenou teplotu přechodu na  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  a z grafu odečteme, že této hodnotě odpovídá relativní světelný tok 85 % pro bílou a 65 % pro červenou barvu.



Graf 1: Závislost relativní svítivosti na teplotě přechodu pro žlutou, červenou a oranžovou LED [1]

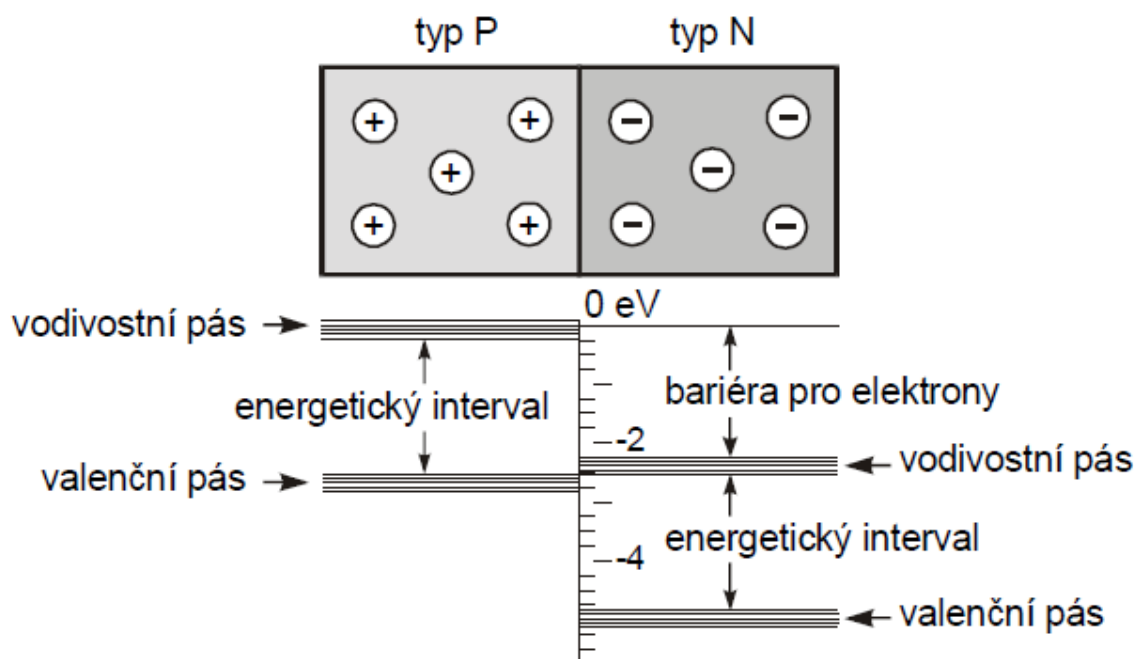


Graf 2: Závislost relativní svítivosti na teplotě přechodu pro modrou, zelenou a bílou LED [1]

**Ztráty elektrické.** Napájecí zdroje pro LED konvertují vstupní energii (ze sítě či baterií) na konstantní proud. Jako u každého konvertoru, ani tyto nepracují se 100 % účinností. Elektrické ztráty ve zdroji snižují účinnost svítidla, neboť převádějí část energie místo ve světlo, tak v teplo.

## 2. Princip činnosti LED

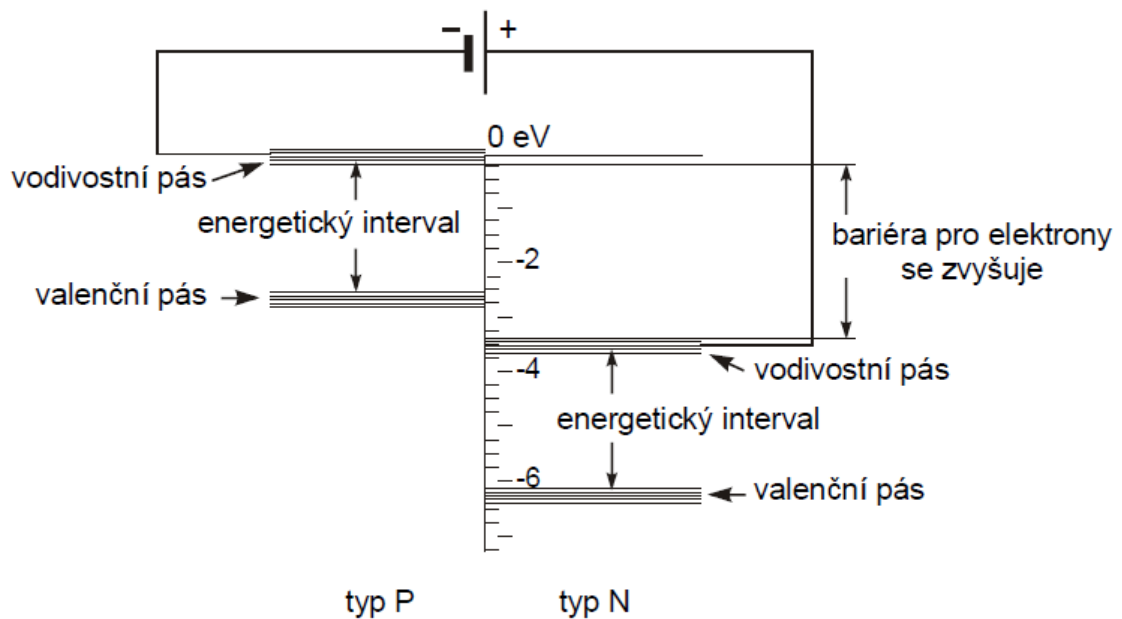
LED je vytvořena spojením polovodiče typu N a polovodiče typu P. Elektrony v pevných látkách (tedy i v polovodičích) se mohou podle pásové teorie pevných látek nacházet v různých stavech. Elektrony s nejvyššími energiemi nemohou pevnou látku opustit, ale mohou se v ní volně pohybovat, nejsou tedy vázány k určitému atomu (nacházejí se v tzv. vodivostním pásu). Elektrony s nižšími energiemi jsou již vázány k určitému atomu, který nemohou samy opustit (nacházejí se v tzv. valenčním pásu – energetický interval mezi vodivostním a valenčním pásem se často označuje jako zakázaný pás). Není-li dioda připojena ke stejnosměrnému zdroji vodivostní pásy v polovodiči typu P a typu N nejsou propojeny a diodou neprotéká proud (viz Obr. 3).



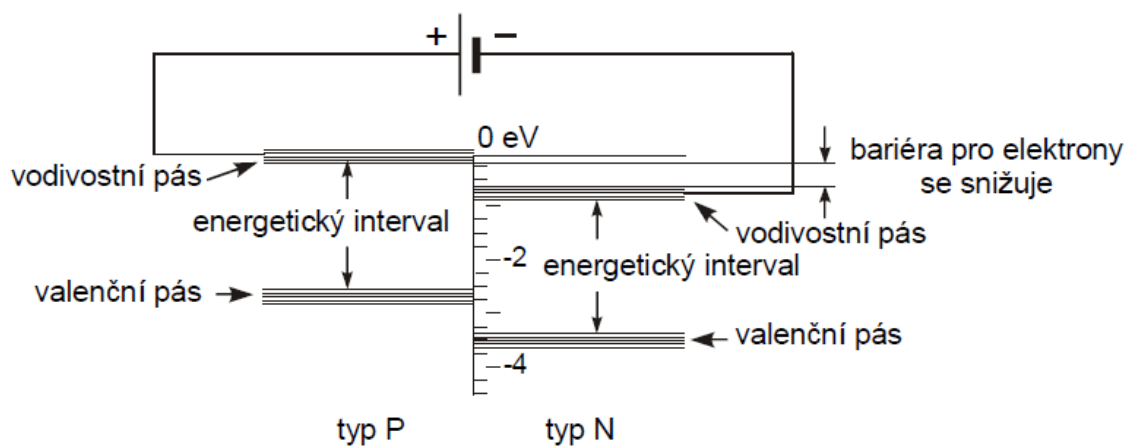
Obr. 3: Dioda nepřipojená ke zdroji [2]

Při zapojení diody v závěrném směru (záporný pól stejnosměrného zdroje je připojen k polovodiči typu P a kladný pól k polovodiči typu N) se bariéra pro přechod elektronů z N do P zvyšuje a diodou protéká proud (viz Obr. 4).

Při zapojení diody v propustném směru (záporný pól stejnosměrného zdroje je připojen k polovodiči typu N a kladná pól k polovodiči typu P) se bariéra pro přechod elektronů z N do P snižuje (viz Obr. 5).



Obr. 4: Dioda v závěrném směru [2]



Obr. 5: Dioda v propustném směru [2]

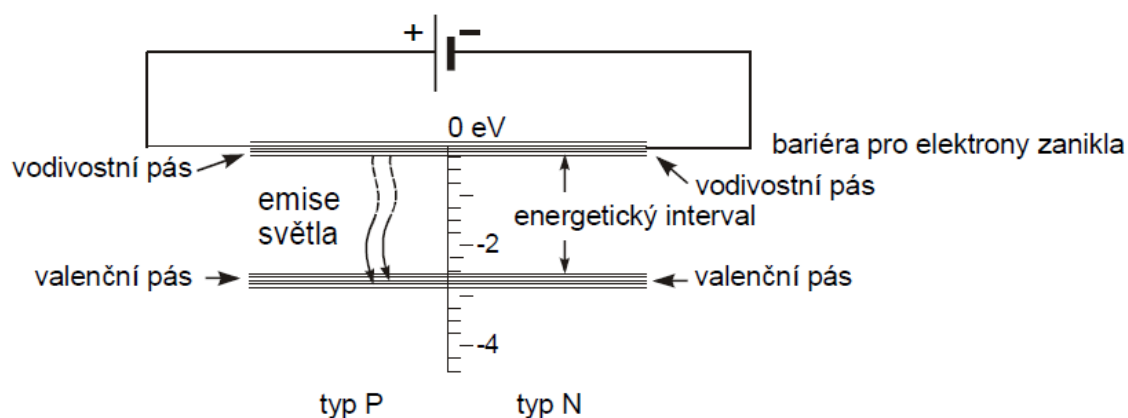
Zvyšuje-li se napětí u stejnosměrného zdroje při zapojení diody v propustném směru, dojde pro určitou hodnotu napětí  $U$  k zániku bariéry bránící přechodu elektronů z polovodiče typu N do polovodiče typu P (vodivostní pásy v N a P jsou propojeny). Vodivostní elektrony volně přecházejí z N do P, diodou teče proud (viz Obr. 6).

Vodivostní elektrony mohou zaplňovat díry ve valenčním pásu v polovodiči typu P a také vyrážet při srážkách valenční elektrony z valenčního do vodivostního pásu. Při přechodu elektronu z vodivostního do valenčního pásu (zaplnění díry ve valenčním

pásu) může být uvolněna energie  $E$ , rovná rozdílu energií vodivostního a valenčního pásu, vyzářena ve formě fotonu. Pro energii tohoto fotonu platí:

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka fotonu,  $h$  Planckova konstanta,  $c$  rychlost světla.

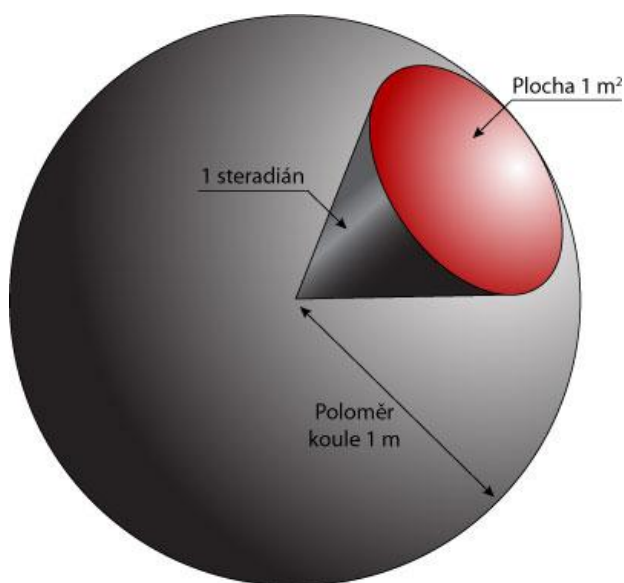


Obr. 6: Tok proudu diodou [2]

Toto je známý Planckův zákon, který konstatuje, že záření o frekvenci  $f$  může být vyzařováno, nebo pohlcováno jen po kvantech energie o velikosti  $E$ .

### 3. Světelný tok, intenzita osvětlení, svítivost

**Světelný tok** vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem. Značkou je obvykle  $F$  (někdy také  $\Phi$ ). Jednotkou světelného toku je lumen (lm), který je definován jako světelný tok, který izotropní zdroj o svítivosti 1 cd (candela) vysílá do prostorového úhlu 1 sr (steradián). Steradián je část kuželového prostoru s vrcholem ve středu jednotkové koule omezená na této kouli jednotkovou plochou (viz Obr. 7).



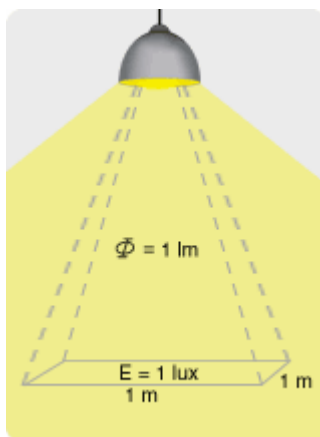
Obr. 7: Steradián [3]

**Intenzita osvětlení** je veličina udávající kolik světelného toku dopadne na plochu. Značka je  $E$  a jednotkou je 1 lux (lx), což je osvětlení způsobené světelným tokem 1 lm dopadajícím na plochu 1 m<sup>2</sup>.

$$E = \frac{F}{r^2} \cos \alpha \quad (2)$$

Osvětlení je tedy nepřímo úměrné čtverci vzdálenosti a je tím slabší, čím šikměji paprsky dopadají.





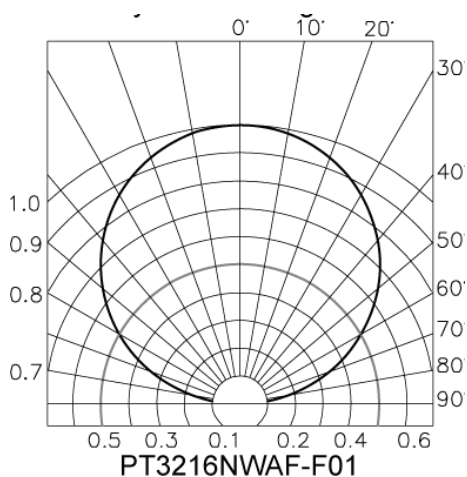
Obr. 8: Intenzita osvětlení [4]

**Svítivost** je veličina, která udává střední hustotu světelného toku do prostorového úhlu. Značka je  $I$  a jednotkou je 1 candela (cd).

Pro bodový zdroj platí následující vztah:

$$F = E \cdot 4\pi \cdot r^2 \quad (3)$$

Vlastností bodového zdroje světla je, že jeho povrch je schopen odrážet paprsky do všech směrů. Ideální bodový zdroj je izotropní, tj. do všech směrů vyzařuje stejně, ovšem v praxi se setkáváme se zdroji neizotropními a to jsou takové, kde intenzita závisí na směru vyzařování.



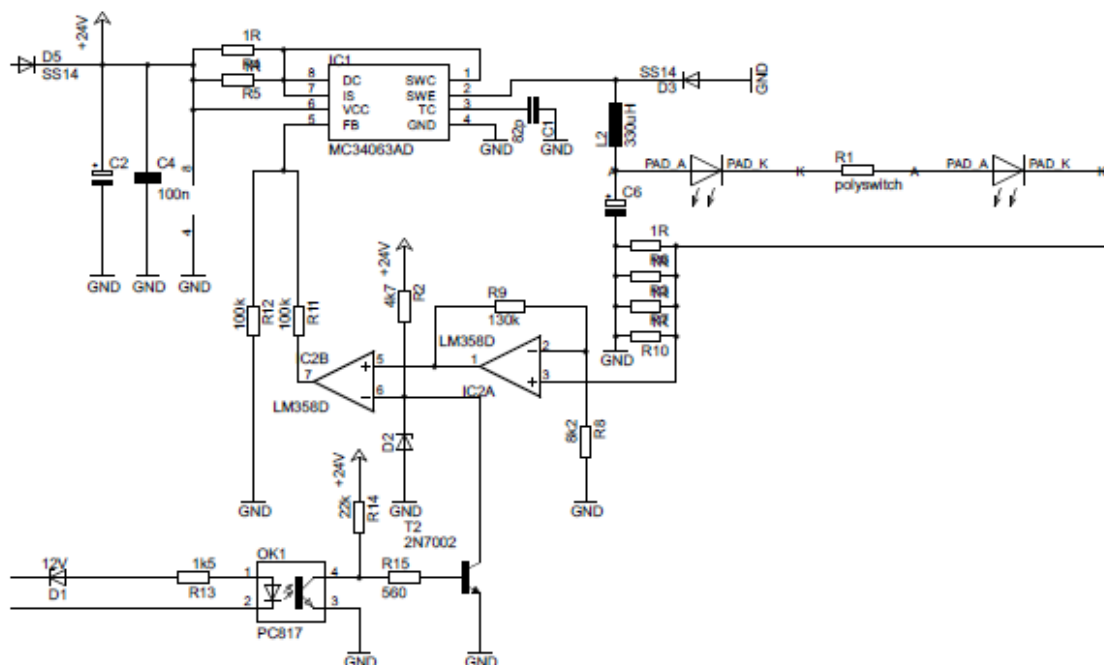
Obr. 9: Vyzařovací diagram [5]

## 4. Výroba přípravků a úprava svítílen

Svítílen bylo dodáno 8 ks. Do měření bylo zapojeno 7 ks z důvodu, že na jedné se prováděly prototypové úpravy a došlo k jejímu zničení. Svítílny obsahovaly mimo řídicí elektroniky také 2 LED buď teple bílé (XR-E) nebo červené (XR-C) barvy. LED byly objednány od firmy TRON, značky Cree řady XR-E (teplá bílá, neutrální bílá, studená bílá), řady 7090 (modrá, tmavě modrá – royal blue, zelená, oranžová) a řady XR-C (červená). LED byly dodány již zapájené do plošného spoje, bohužel byly dodány nadvakrát, tudíž se stalo, že převážná část červených a teple bílých ledek je na obdélníkovém plošném spoji a zbytek na kulatém plošném spoji, což trochu změnilo plány měření, ale ne natolik aby to výrazně ovlivnilo chystané měření. Samostatné LED byly teplovodivou pastou nalepeny na obdélníkové ploché chladiče.

Původní plán byl takový, že se budou měřit dvojice LED najednou, aby měření bylo co nejvíce podobné svítílnám. Proto jsou barvy červená a teple bílá pro pulzní zatěžování měřeny po dvojicích.

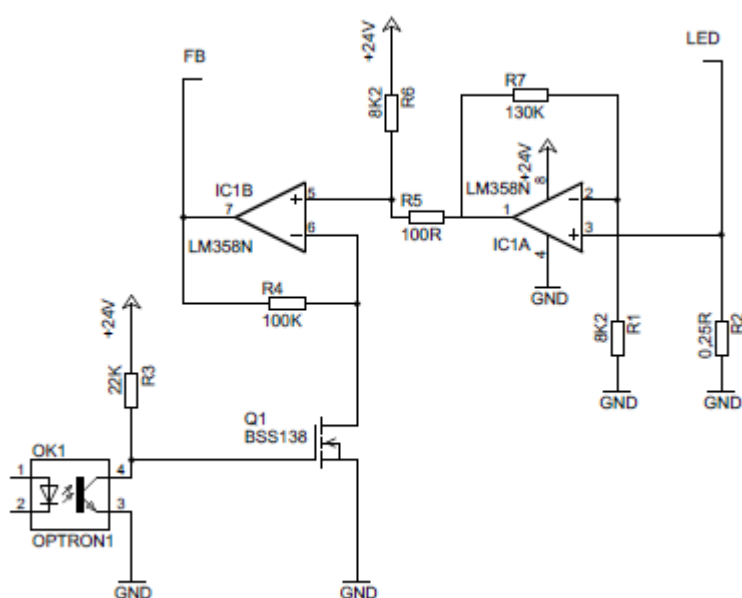
Dodané svítílny tvořila řídicí elektronika a dvě výkonové LED. Schéma svítílny je na obr. 10.



Obr. 10: Svítilny před upravením

Jedná se o zdroj konstantního proudu 700 mA pro dvě sériově zapojené výkonové LED.

Napájecí napětí je přivedeno na diodu, která chrání před přepólováním. Zdroj je spínaný, koncepce STEP DOWN s integrovaným obvodem MC34063. Proud svítivými diodami je snímán na čtyřech paralelně zapojených snímacích odporech. Úbytek napětí je zesílen operačním zesilovačem a za ním je zapojený komparátor, který řídí zpětnovazební vstup do řídicího obvodu. Toto zapojení mělo sloužit k možnosti zapínat zdroj pomocí optočlenu, což se bohužel ukázalo jako nefunkční a bylo nutno zapojení upravit.



Obr. 11: Úprava svítidel fy Applic

Úprava spočívala ve zprovoznění funkce řízení svítidel pomocí opticky odděleného vstupu, svítidlo lze tedy zapínat a vypínat pomocí řídicího napětí, které ovládá optočlen. Není tedy nutné vypínat napájení celé svítidlo. Proud diodami prochází snímacím odporem R2. Úbytek napětí na tomto odporu, který odpovídá proudu svítivými diodami je zesílen v neinvertním zesilovači IC1A 16,85 krát. Druhý zesilovač IC1B funguje jako sledovač napětí. Pokud je sepnutý tranzistor Q1 je na výstupu tohoto zesilovače kladné saturační napětí, které je vyšší než 2,5 V, což je hodnota referenčního napětí v obvodu spínaného zdroje. Je-li Q1 rozepnutý sledovač se ve smyčce zpětné vazby téměř neprojevuje.

Proudová pojistka R1 (viz. Obr. 10) zapojená v sérii s LED se také neosvědčila, protože je přetěžovaná proudově i teplotně, což se zjistilo až v průběhu testování.

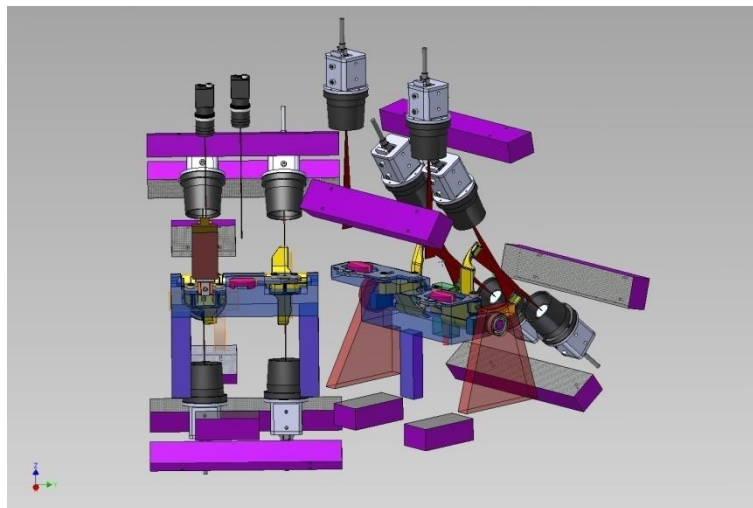
Úbytek napětí na R1 dosahoval až 12V, což způsobilo značný pokles svítivosti. Lepší by bylo tento polyswitch vynechat a použít jen proudovou zpětnou vazbu s teplotní kompenzací a v případě velkých nároků na stabilitu úrovně osvětlení i zpětnou vazbu optickou.



*Obr. 12: Svítidla firmy Applic*

Rovněž dodané výkonové 3W LED bylo potřeba pospojovat do skupin pro pulzní a statické zatěžování. Pro pulzní zatěžování jsem si vybrala po 8 LED od barev: teplá bílá, červená, zelená a oranžová. Pro statické zatěžování pak tytéž barvy, ale po 4 kusech. Všechny barvy jsem využila pro měření volt-ampérové charakteristiky a měření svítivosti během ní.

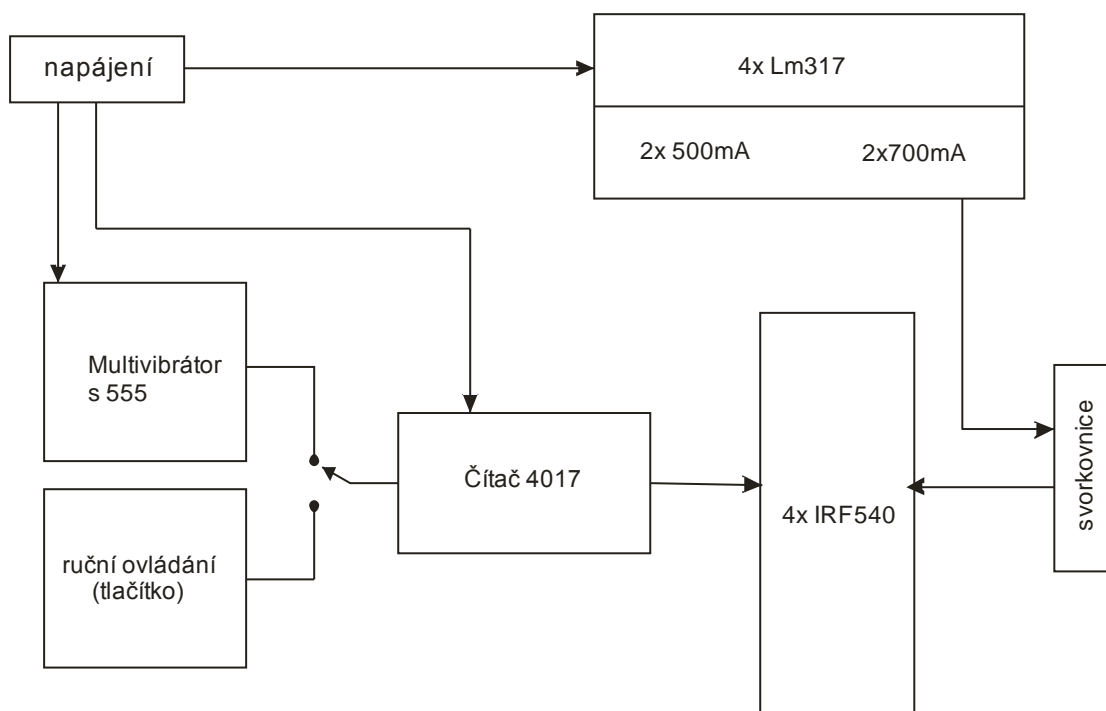
Svítidla a jejich budoucí využití v průmyslu jsou naznačeny na obrázku, který poskytla firma Applic.



*Obr. 13: Plánované využití přípravků fy Applic v průmyslu*

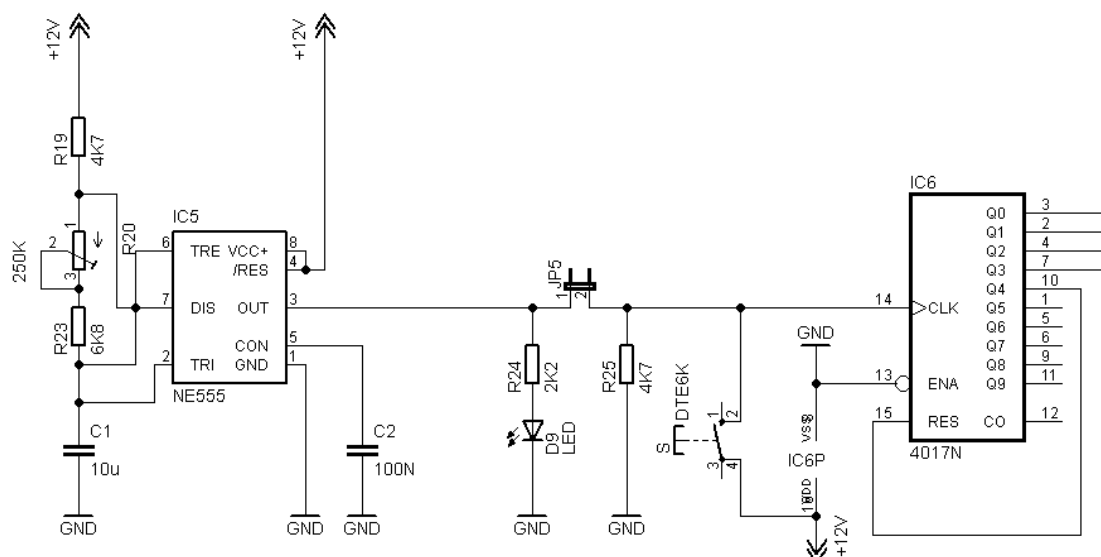
Soustava funguje tak, že světla (fialové kvádry) posvítí krátce na linku, kde se nachází předmět zájmu a kamery (černé) sejmou obraz. Vyhodnocovací středisko pak rozhodne, zda výrobek postupuje dál nebo ne.

Dalším krokem bylo vytvoření proudových zdrojů pro blikající LED, červená barva a oranžová barva jsou na jmenovitý proud 700 mA. Ostatní jsou na 500mA. Blokové schéma je na obr. 14.



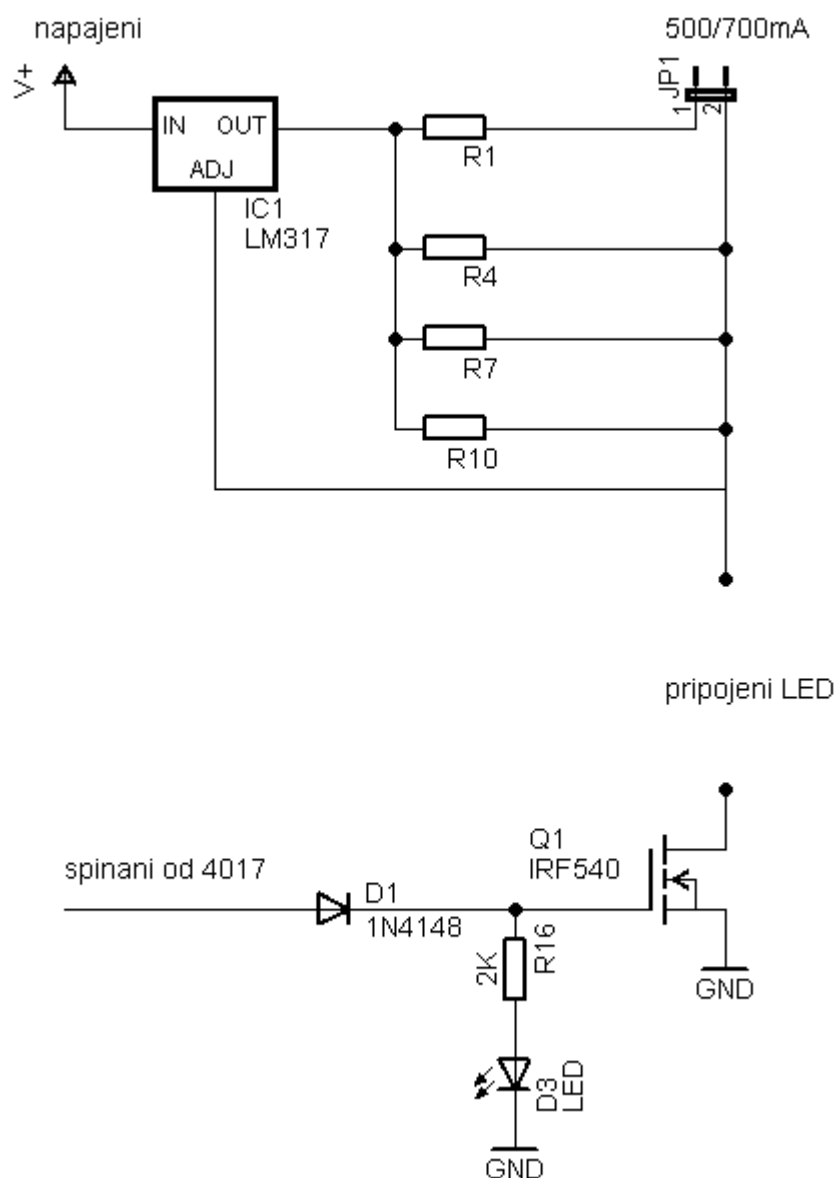
Obr. 14: Blokové schéma „blikacího přípravku“

Základem zapojení jsou čtyři proudové zdroje s nastavitelným proudem 500 nebo 700 mA. Jejich výstup je vyveden na svorkovnici. LED jsou spínány proti zemi výkonovými tranzistory MOSFET. Aby bylo dosaženo samočinného blikání s potřebnou střídou, je jejich spínání řízeno z čítače 4017. Časové impulzy pro přepínání generuje multivibrátor 555, nebo je možno přepnout na ruční ovládání tlačítkem.



Obr. 15: Generátor impulzů a čítač

Obvod se skládá z třech základních částí. Generátoru časových impulzů s obvodem 555, potom z čítače, který ovládá výkonové tranzistory a nakonec z proudových zdrojů s obvodem LM317. Frekvence časovače je nastavitelná trimrem v rozmezí 0,5 – 4 Hz. Čítač je zapojen tak, aby se po čtvrtém impulzu vynuloval a celý cyklus začal znova. Tím, že je aktivní vždy jeden výstup ze čtyř, je napevno daná výstupní střída 1:3 (1 dobu LED svítí a 3 nesvítí). Obvody LM317 v proudovém zdroji jsou v základním zapojení konstantního proudu dle katalogového listu a velikost proudu je možno zvolit 500 nebo 700 mA, změnou velikosti snímacího odporu (propojkou).

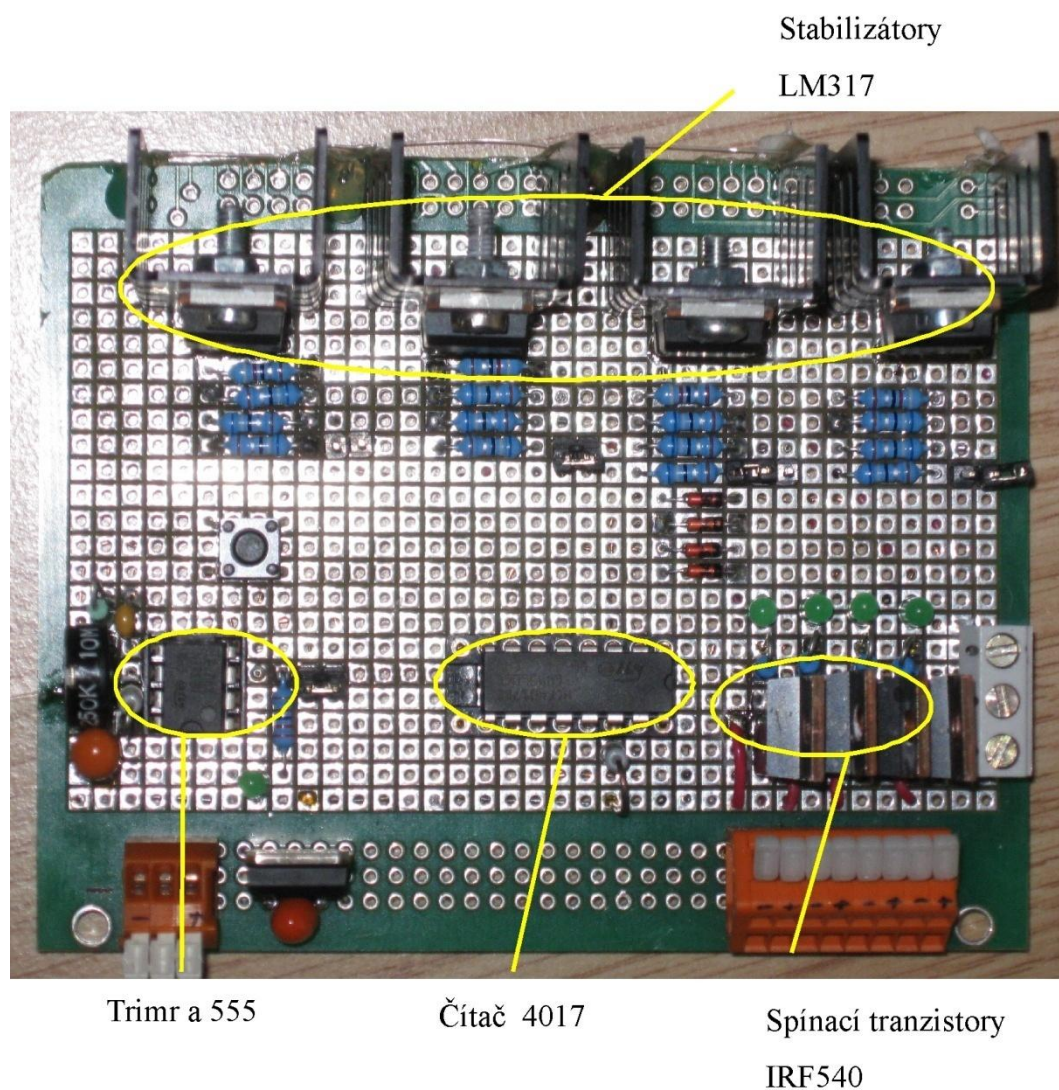


Obr. 16: Jeden kanál výkonové části přípravku – proudový zdroj a spínač

LED pospojované v sérii do bloků jsou napájeny z proudových zdrojů, kdežto svítílny ze zdroje napětí 24 V.

Přípravek byl realizován na malé univerzální desce plošných spojů. Napájení proudových zdrojů je vyvedeno zvlášť. Stabilizátory jsou osazeny malými chladiči, které postačily pro trvalý provoz přípravku. Multivibrátor a čítač jsou napájeny ze zvláštního zdroje přes stabilizátor 12V.

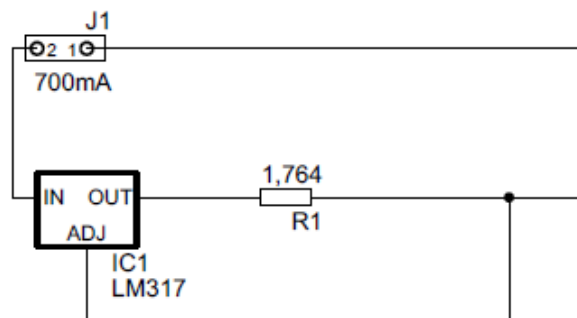




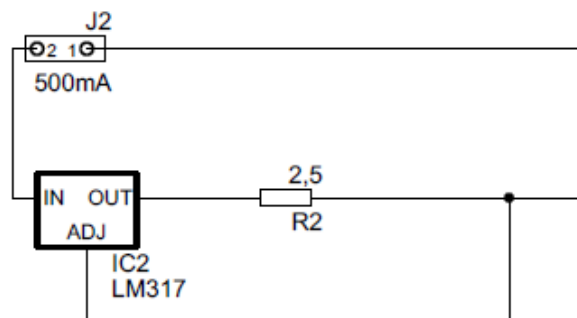
*Obr. 17: Realizace destičky na blikání*

Další částí je statické zatěžování LED spojených do série, které je realizováno proudovým zdrojem LM317 umístěným na velkém chladiči, kvůli lepšímu chlazení pro trvalý provoz. Schéma je uvedeno na obr. 18.





a)



b)

Obr. 18: Přípravek pro statické zatěžování a) 700 mA b) 500 mA

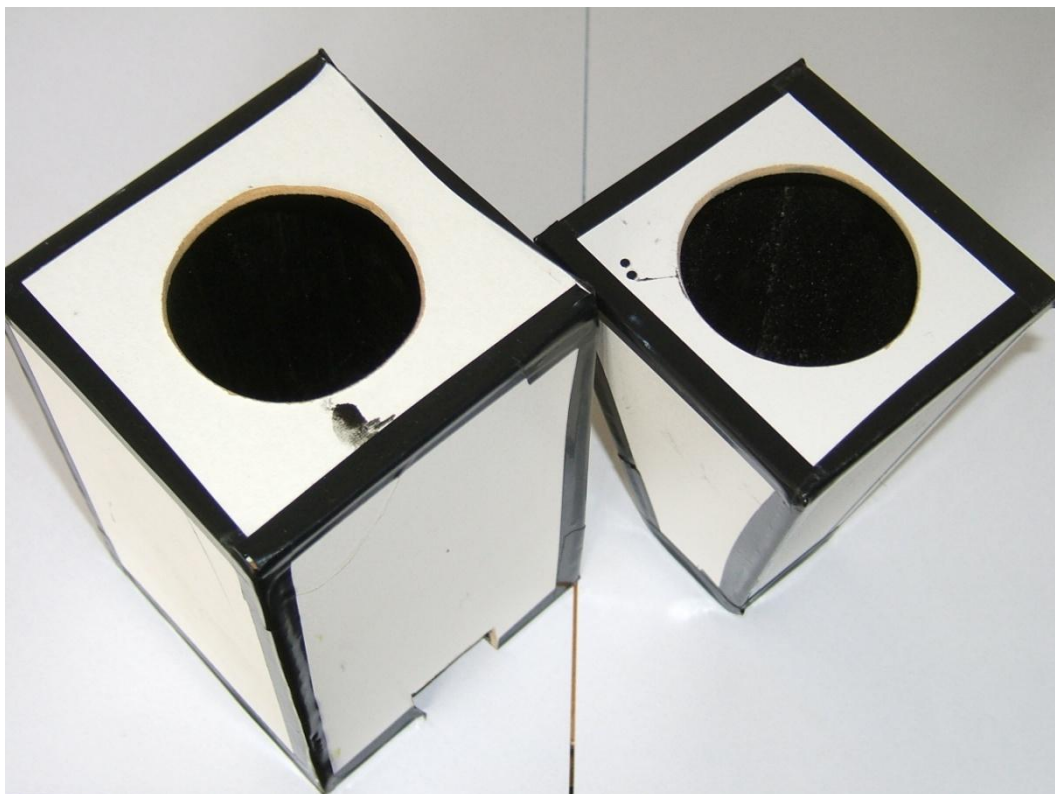
Na zdroji bylo nastaveno co nejnižší napětí, tak aby obvody tekly požadovaný proud. Když se LED a svítilny zapojily, mohlo začít dlouhodobé měření svítivosti. Stalo se tak 7. 12. 2010.

Svítivost byla měřena luxmetrem LX 1108 fy Lutron, přikládaným na dřevěnou temnou komoru, kde byl ze spodu otvor pro LED a nahoře ve vzdálenosti 12 cm od LED byl otvor pro čidlo luxmetru. Svítilny se měřily stejně, jen byl zvolen jiný tvar výřezu ve spodní části černé komory (viz. obr. 19). K měření teploty, bylo použito snímače teploty Pt100 napojeného na přístroj Almemo.

Nejistota měření pro hodnotu 3 685 lx měřenou na rozsahu 0 - 4 000 lx (koeficienty  $\Theta = \sqrt{3}$ ,  $k = 2$ ):

$$U = \frac{3\%rdg + 0,5\%FS}{\Theta} \cdot k = \frac{110,55 + 20}{\sqrt{3}} \cdot 2 = 87 \text{ lx}$$

$$E = (3685 \pm 87) \text{ lx}$$
(4)



*Obr. 19: Dřevěné temné komory*

Měřila se každý týden svítivost jednotlivých ledek a přípravků a zároveň se sledovala teplota, která měla být orientační, protože nebylo zajištěno, aby LED byly stejně chlazeny, kvůli použití různých velikostí chladičů. Zároveň bylo provedeno měření volt-ampérové charakteristiky všech dostupných barev LED a jejich postupný nárůst svítivosti.

Měření skončilo 29. 3. 2011 (tj. po 112 dnech = 2688 hodinách), což je pouze 5,4 % životnosti LED udané výrobcem (50 000 hodin). Z toho důvodu není předpokládán žádný pokles svítivosti, u samostatných LED, jak v pulzním tak trvalém zatěžování. Otázkou však je, jak si s dlouhodobým pulzním zatížením vedly svítilny. Již na počátku měření měly sklon, po delším čase při měření, kdy musely být vystaveny trvalému svícení, snižovat svůj světelný výkon. To však nevadí, v praxi budou zatěžovány pouze pulzně. Co je však směrodatné, jak se projevil čas na okamžité svítivosti. Přípravky za dobu zkoušení blikly přibližně 25,5 milionkrát s tím že, doba svitu je 380 ms doba zhasnutí je 1140 ms.

## 5. Vyhodnocení naměřených dat

Nejprve byla intenzita osvětlení (lx) přepočtena na světelný tok (lm), a to ani ne tak z důvodu dalšího zpracování, ale spíše pro kontrolu jestli naměřené hodnoty odpovídají tomu, co udává výrobce.

### 5.1 Praktická ukázka vyhodnocování dat

Pro případ bakalářské práce byla rovnice pro bodový zdroj upravena. Jelikož LED je neizotropní zdroj, z toho vyplývá, že v rovnici musí figurovat úhel. Dále pak  $\omega$ , v základní rovnici prezentováno jako  $4\pi$  se změnilo. Konkrétně na:

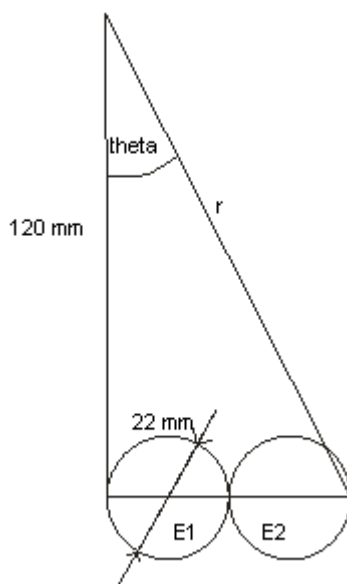
$$\omega = 2\pi \cdot (1 - \cos(\vartheta / 2)) \quad (5)$$

Celá rovnice pro přepočet luxů na lumeny tedy vypadá:

$$F = \sum_{i=0^{\circ}}^{90^{\circ}} E_i \cdot \omega_i \cdot r_i^2 \cdot \cos \vartheta_i \quad (6)$$

Každá LED má nějaký úhel vyzařování ( $0 - 180^{\circ}$ ), s výhodou lze využít toho, že je osově symetrická, stačí počítat tedy jen od  $0^{\circ}$  do  $90^{\circ}$ .  $r_i$  je vzdálenost čidla od LED.

Jako krok byl zvolen průměr čidla, tj. 22 mm. Lépe to zobrazuje následující obrázek.

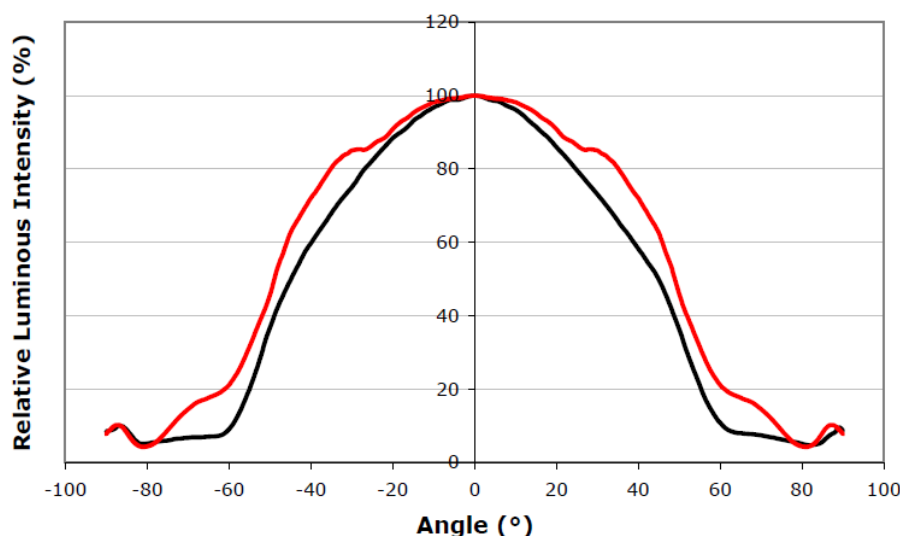


Obr. 20: Znárodnění výpočtu světelného toku (lm)

Pro názornost je uveden příklad výpočtu prvních čtyř kružnic ( $E_0 - E_3$ ). To, kolik kružnic je zvoleno, je úměrné přesnosti, čím více tím je výpočet přesnější, v práci je zvoleno jedenáct kružnic.

Prvním krokem je výpočet úhlu  $\vartheta_i$ . Prostým užitím goniometrických funkcí spočítáno, že:  $\vartheta_0 = 0^\circ$      $\vartheta_1 = 10,39^\circ$      $\vartheta_2 = 20,14^\circ$      $\vartheta_3 = 28,81^\circ$

Druhým krokem je přiřazení k vypočteným úhlům jejich relativní světelný tok v procentech, který je uveden v katalogovém listu LED. Např. pro bílou LED XR-E černá křivka na grafu 3.



Graf 3: Změna vyzařovaného toku v závislosti na úhlu [6]

Např.  $E_0 = 100 \%$      $E_1 = 96 \%$      $E_2 = 86 \%$      $E_3 = 75 \%$

Třetím krokem je výpočet  $\omega$  podle vzorce:

$$\omega = 2\pi \cdot (1 - \cos(\vartheta / 2)) \quad (7)$$

První kružnice je posunuta doprostřed tak, že se bere v úvahu pouze polovina úhlu. K dalším kružnicím se pak přičte předchozí úhel a odečte předchozí  $\omega$ .

$$\omega_0 = 2\pi \cdot (1 - \cos(0 / 2)) = 0 \quad (8)$$

$$\omega_1 = 2\pi \cdot (1 - \cos((10,39 / 2) / 2)) - \omega_0 = 0,00646 \quad (9)$$

$$\omega_2 = 2\pi \cdot (1 - \cos((5,195 + 10,39) / 2)) - \omega_1 = 0,05156 \quad (10)$$

$$\omega_3 = 2\pi \cdot (1 - \cos((5,195 + 20,14) / 2)) - \omega_2 = 0,10138 \quad (11)$$

Čtvrtým krokem je výpočet přepony  $r$ , pomocí goniometrických funkcí:

$$r_i = \frac{120}{\cos \Theta}, \quad (12)$$

kde  $\Theta$  je úhel, který je posunutý o půlkružnici, pro příklad:

$$\begin{array}{llll} \Theta_0 = 0^\circ & \Theta_1 = 5,19^\circ & \Theta_2 = 15,585^\circ & \Theta_3 = 25,335^\circ \\ r_0 = 120 \text{ mm} & r_1 = 120,49 \text{ mm} & r_2 = 124,58 \text{ mm} & r_3 = 132,77 \text{ mm} \end{array}$$

Posledním krokem je uplatnění vztahu (6) pro přepočet intenzity osvětlení (lx) na světelný tok (lm), kde za  $E_i$  je dosazena hodnota změřená v luxech násobena relativním světelným tokem v procentech (v našem případě  $E_0 - E_3$ ). Výsledné číslo je světelný tok, který vyzáří daná barva, v tomto případě bílá, kde byla naměřena intenzita osvětlení 3687 lx odpovídající světelnému toku 103,5 lm.

## 5.2 Rozdíl mezi hodnotami naměřenými a udávanými výrobcem

Z každé z měřených barev (teplá bílá, červená, zelená a oranžová) jsou pořízeny tabulky (viz. přílohy B a C). Zkrácený přehled viz tab 1 a 2.

		Hodin provozu			datasheet
		1000	2000	2700	
TEPLÁ BÍLÁ	lx	3258	3258	3847	80,6
	lm	91	91	108	
ČERVENÁ	lx	2140	2056	2031	39,8
	lm	52	50	50	
ZELENÁ	lx	2176	2127	2092	67,2
	lm	102	100	98	
ORANŽOVÁ	lx	1834	1751	1751	67,2
	lm	86	82	82	

Tab. 1: Blikající LED

		Hodin provozu			datasheet
		1000	2000	2700	lm
TEPLÁ BÍLÁ	lx	3258	3258	3847	80,6
	lm	91	91	108	
ČERVENÁ	lx	2140	2056	2031	39,8
	lm	52	50	50	
ZELENÁ	lx	2176	2127	2092	67,2
	lm	102	100	98	
ORANŽOVÁ	lx	1834	1751	1751	67,2
	lm	86	82	82	

Tab. 2: Trvale svítící LED

Z tabulek je vidět, že výrobce vždy udává menší světelný tok, než je naměřen. Jde to vysvětlit tím, že výrobce garantuje tuto svítivost v daleko těžších podmínkách, než byly LED měřeny. Velkou roli na tom hraje teplota, která během měření nepřekročila hranici  $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ . Výrobce stanovuje jako mezní bod teplotu  $80\text{ °C}$ . Hodnota u trvale svítící teple bílé po 2700 hodinách je nejspíše zatížena chybou, protože nejbližší měření tj. po 2300 hodinách, vykazuje pokles na 89 lm. Blikající LED se držely na konstantní hladině, díky tomu že svítily přerušovaně, tzn. 2700 hodin provozu blikajících LED je rovno 900 hodinám trvalého svícení, ale ani tam se měření nepřiblížilo hodnotám udaným výrobcem. U trvale svítících LED je těžko říci, zda pokles je v rámci chyby měření a tudíž, že světelný tok je konstantní, nebo došlo k mírnému poklesu během 5,4 % doby životnosti, po kterou byly LED zatěžovány.

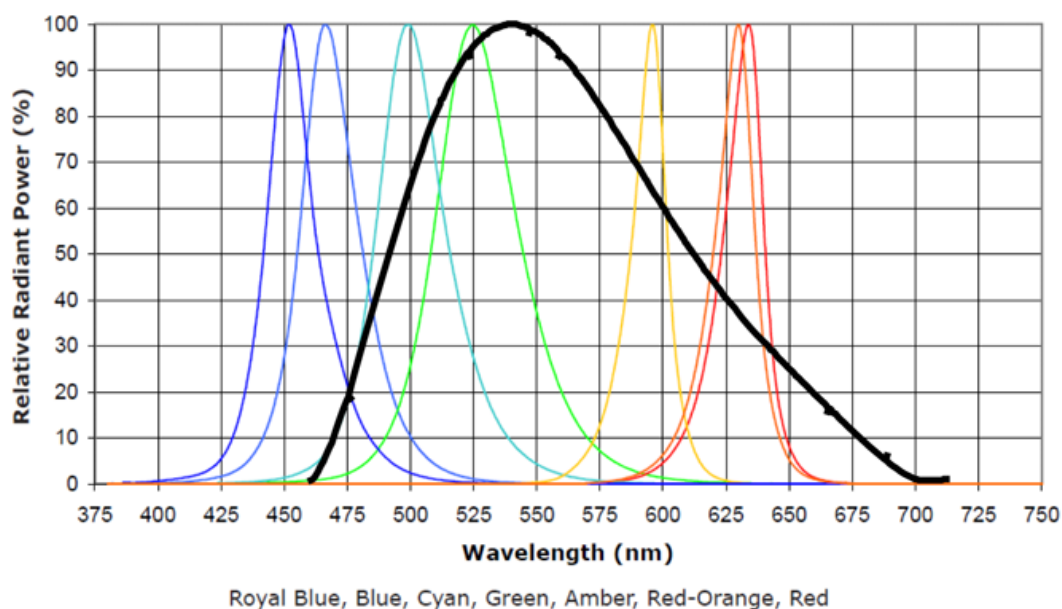
Byla naměřena také volt-ampérová charakteristika, která se zcela shoduje s charakteristikou uvedenou výrobcem. Od každé barvy, která byla k dispozici, se měřily dvě LED, tak že se nastavoval proud od 0 do maxima (700 mA – červená, oranžová; 500 mA - chladná bílá, neutrální bílá, teplá bílá, zelená, royal blue a modrá) po 50 mA a měřil se světelný tok a napětí na LED (viz. Příloha E).

	LED 1			LED 2		
I [mA]	U1 [V]	E1 [lx]	F1 [lm]	U2 [V]	E2 [lx]	F2 [lm]
0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
50	2,69	525	14,74	2,69	494	13,87
100	2,78	1 042	29,25	2,78	977	27,43
150	2,84	1 504	42,23	2,84	1 416	39,76
200	2,95	1 926	54,07	2,90	1 813	50,90
250	2,94	2 343	65,78	2,96	2 221	62,36
300	2,97	2 741	76,96	2,99	2 669	74,93
350	3,00	3 055	85,77	3,02	2 906	81,59
400	3,03	3 380	94,90	3,05	3 240	90,96
450	3,05	3 644	102,31	3,08	3 521	98,85
500	3,08	3 863	108,46	3,10	3 707	104,08

*Tab. 3: Volt-ampérová charakteristika LED teplá bílá*

Přepočet naměřené intenzity osvětlení (lx) na světelný tok (lm) byl proveden podle již výše zmíněného postupu. Z tabulky je patrné, že při zvyšování proudu se pomalu zvyšovalo i napětí až dosáhlo svého vrcholu na hodnotě mírně převyšující 3 V u bílých LED. Hodnoty 2,2 V u červených a oranžových LED a hodnoty 3,5 V u modré, royal blue a zelené LED. Maximální hodnota naměřená luxmetrem, není nejvyšší možnou hodnotou krátkodobým zvýšením proudu, lze dosáhnout větší intenzity osvětlení, ovšem

za cenu snížení životnosti LED, nebo jejího úplného zničení. U modré a royal blue je naměřená intenzita osvětlení velice nízká, je to z důvodu, že vlnová délka je velice blízká ultrafialové oblasti. V luxmetru je použit fototranzistor, který má nelineární charakteristiku ve viditelné oblasti spektra. Modrá a royal blue jsou mimo jeho spektrální citlivost (viz. Graf 4).

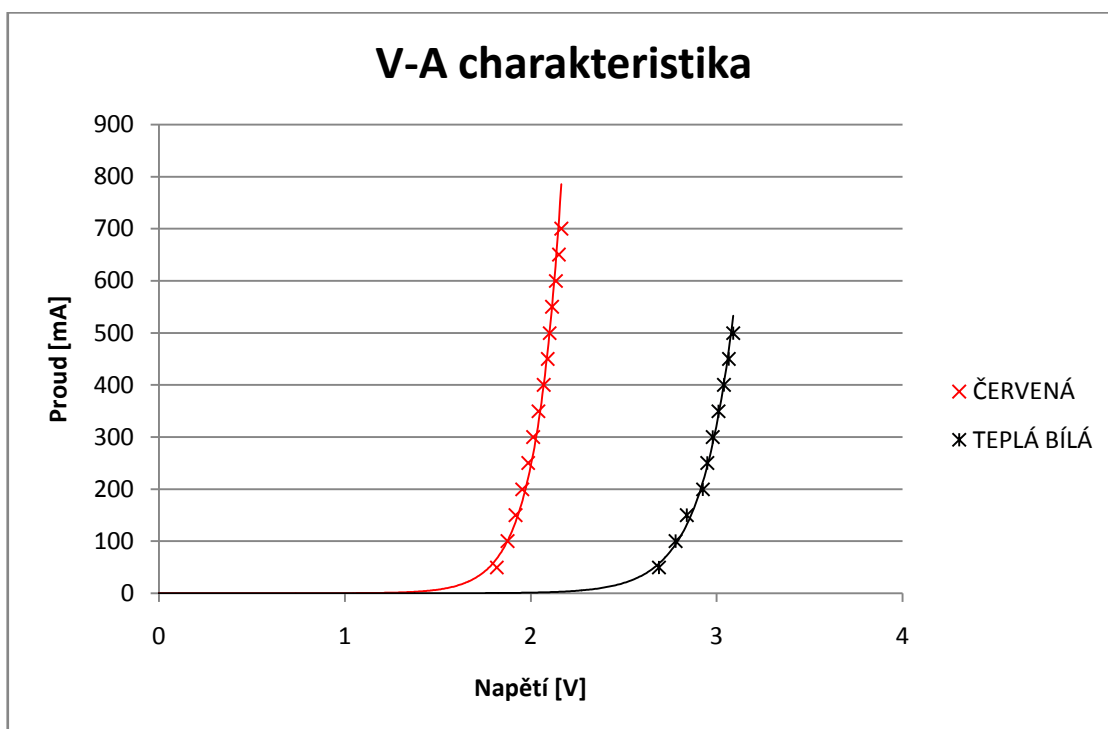


*Graf 4: Černě zobrazena citlivost použitého luxmetru*

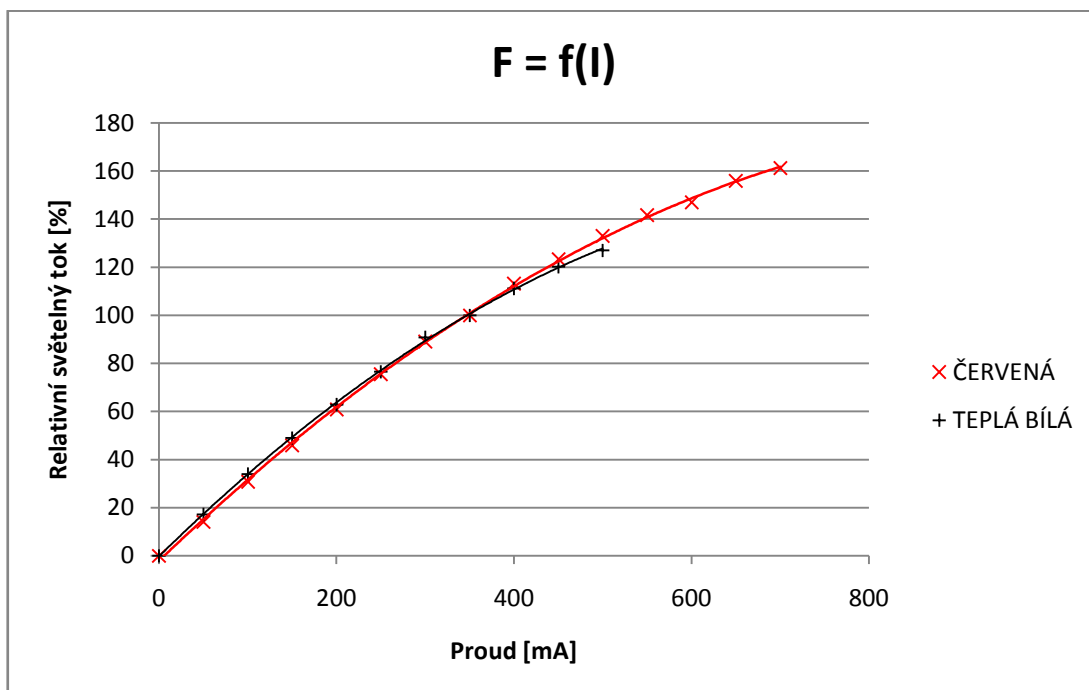
### 5.3 Volt-ampérová charakteristika

Důvod proč byla měřena volt-ampérová charakteristika je, potvrzení údajů udávaných výrobcem.

Následující grafy zobrazují volt-ampérovou charakteristiku jednotlivých barev LED, tak jak byla naměřena. Ve všech případech se volt-ampérová charakteristika shoduje s údaji uvedenými výrobcem. U každé z volt-ampérových charakteristik je také uvedena závislost relativního světelného toku v procentech na proudu. Hodnota 100 % je uvažována při proudu 350 mA, tak jak je uvedeno v katalogových listech výrobce. Tato závislost je rovněž shodná s údaji, které udává výrobce. Pro červenou a teple bílou viz Graf 5 a Graf 6, ostatní (viz. příloha F).



Graf 5: Volt-ampérová charakteristika červené a teple bílé LED

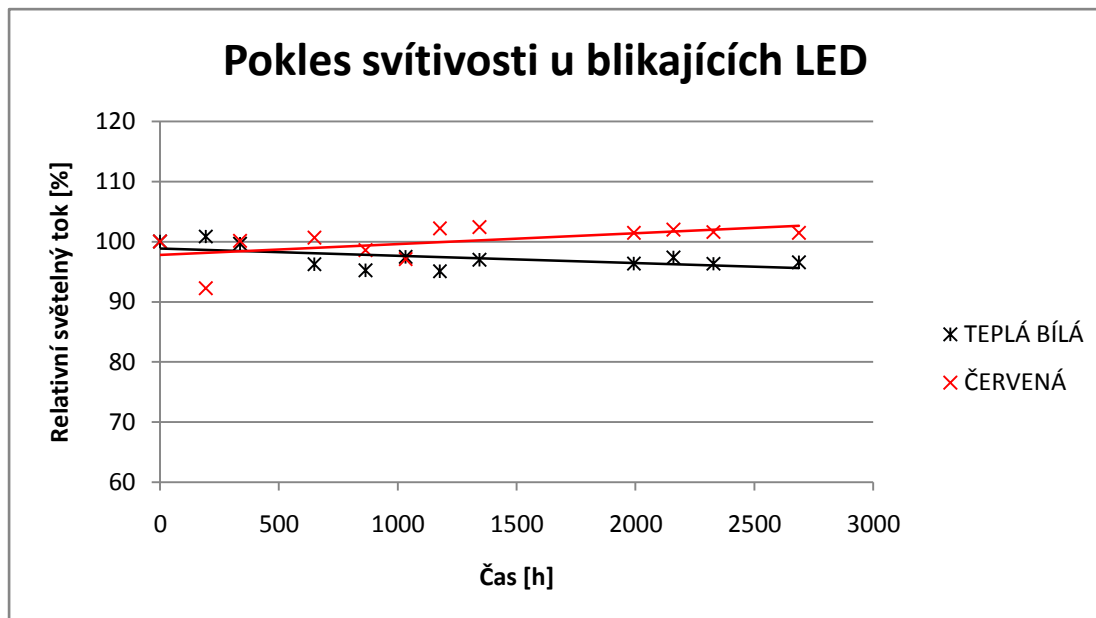


Graf 6: Závislost relativního světelného toku v procentech na proudu



## 5.4 Stárnutí blikajících LED

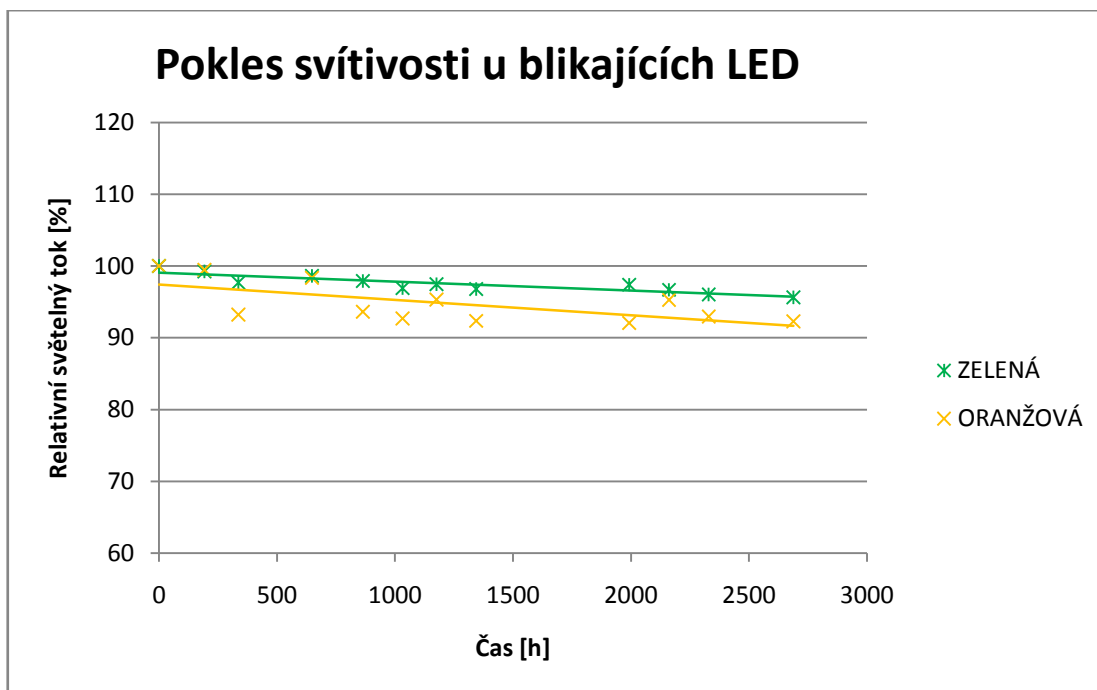
Dlouhodobé měření blikajících LED jsem zobrazila do grafů, kde relativní světelný tok závisí na čase. Hodnota 100 % je uvažována za studena, byla naměřena při startu měření, v době, kdy LED se nemohly ještě ohřát na provozní teplotu.



Graf 7: Relativní pokles svítivosti u blikajících LED teplá bílá a červená

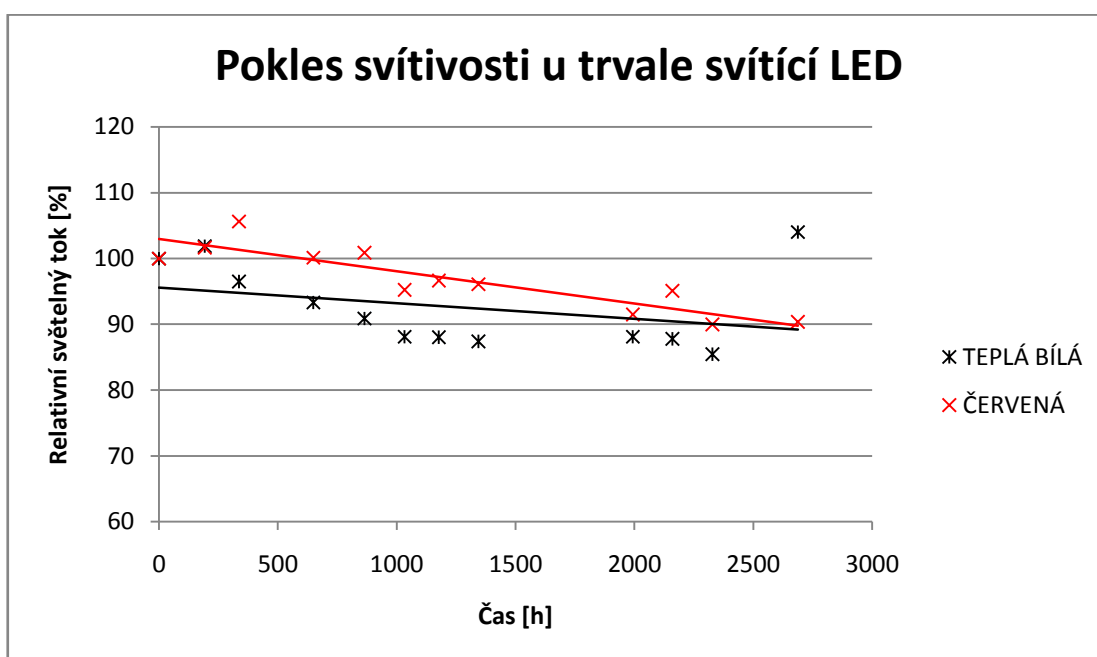
Červená LED se i po ohřátí držela na stejné úrovni v rámci chyby měření, tj. časem nestárla. Teple bílá LED je na tom podobně, byl zaznamenán jen slabý pokles, který mohl být způsoben chybou měření. U zelené LED byly naměřeny hodnoty za tepla nižší než za studena a rozptyl těchto hodnot je menší než u teple bílé. Znamená to, že LED s časem klesala svítivost, ale jen velmi mírně. Trochu víc klesala svítivost u oranžové LED, kde byl, na konci měření, zaznamenán pokles svítivosti o 8 %.

Celkově lze říct, že blikající LED měly velmi mírnou nebo žádnou tendenci stárnout. Může to být způsobeno tím, že byly, díky pulznímu režimu, kratší dobu v provozu.



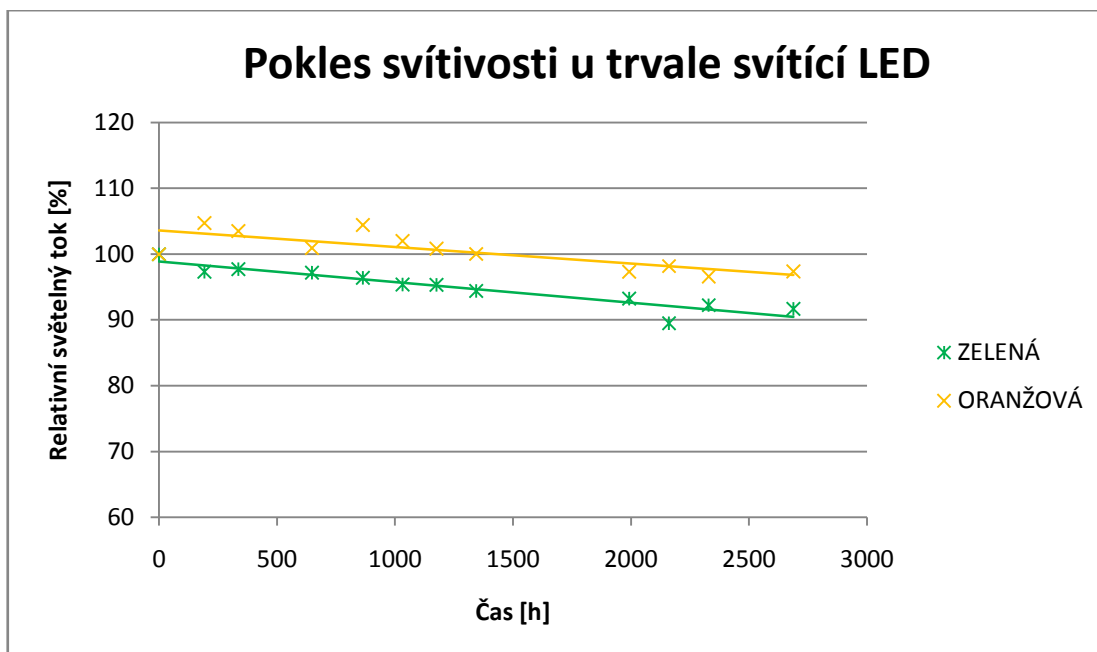
*Graf 8: Relativní pokles svítivosti u blikajících LED zelená a oranžová*

## 5.5 Stárnutí trvale svítících LED



*Graf 9: Relativní pokles svítivosti u trvale svítících LED teplá bílá a červená*

U trvale svítících LED je vidět pokles svítivosti. Teplá bílá klesala již od začátku na rozdíl od červené, která se prvních tisíc hodin držela na úrovni svého nezahřátého stavu, pak ale začala klesat. Po 2 700 hodinách poklesla svítivost jak teple bílé tak červené shodně o 10 %. Poslední naměřená hodnota u teple bílé je chybná, ale regresní křivka ji zohledňuje.

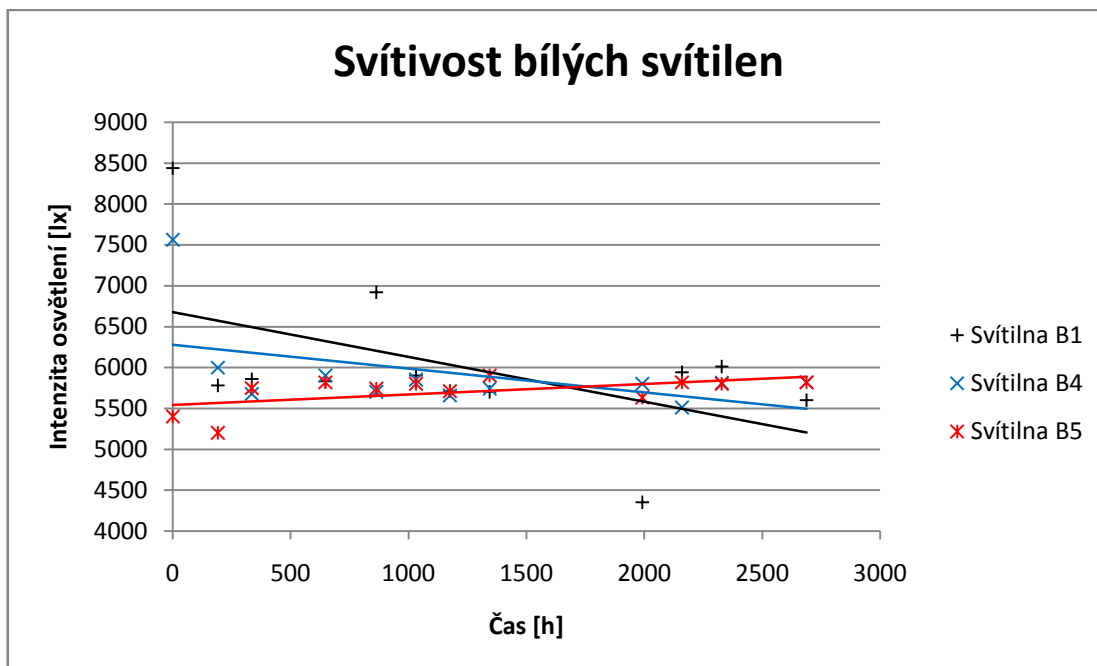


*Graf 10: Relativní pokles svítivosti u trvale svítících LED zelená a oranžová*

Zelená klesala obdobně jako teple bílá již od začátku měření a na konci měření klesla rovněž o 10 %. Oranžová se po celou dobu měření držela na své nad hranici své svítivosti za studena.

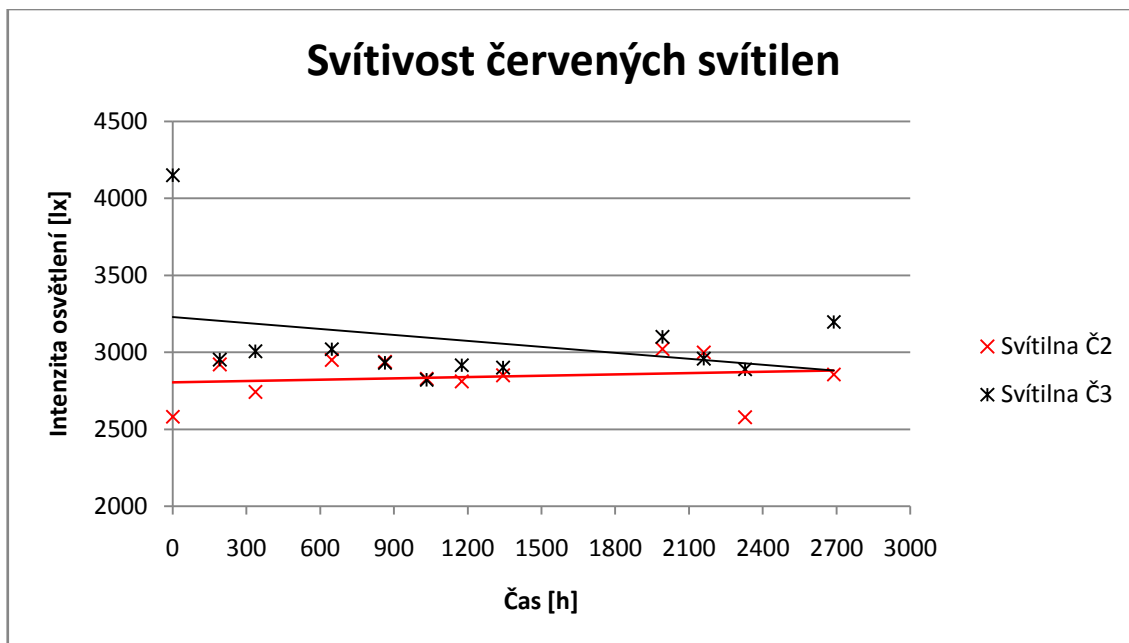
## 5.6 Stárnutí svítílen firmy Applic

Svítílny byly označeny B (bílá) nebo Č (červená) a pořadové číslo (1 – 7).

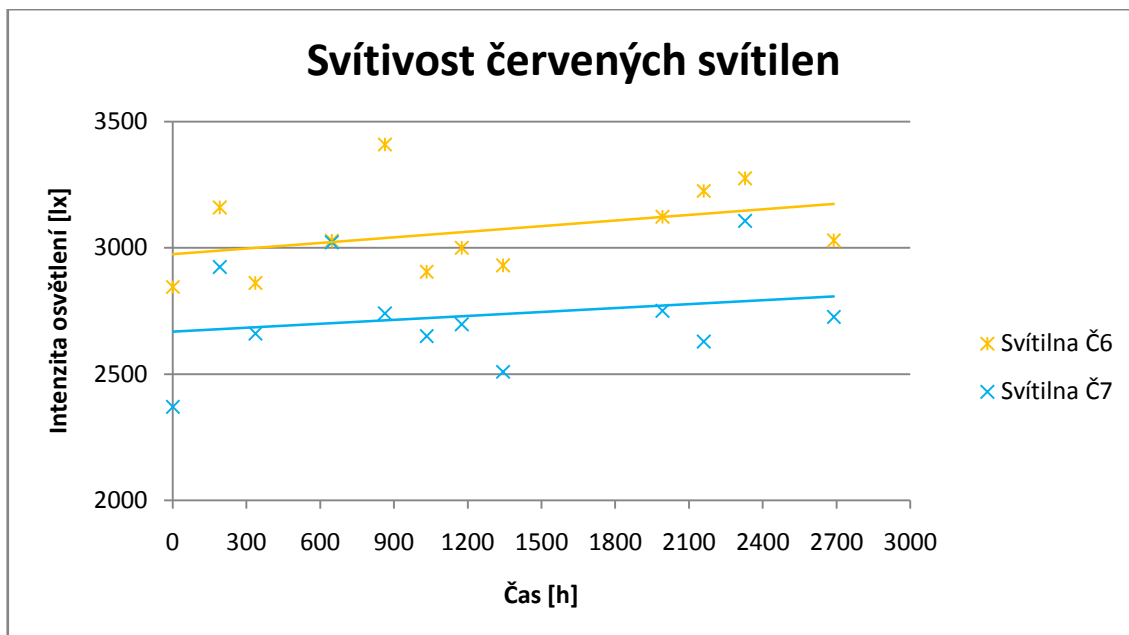


*Graf 11: Pokles intenzity osvětlení u svítílen firmy Applic barvy bílé*

U svítilek bílých (B1, B4, B5) se intenzita osvětlení, za studena velmi různá, s časem ustálila na mezi 5 200 lx – 5 700 lx. Svítidla B5 jako jediná si udržela konstantní intenzitu osvětlení jak za studena, tak za provozní teploty. Ostatní dvě bílé svítidly měly pokles oproti svému nezahřátému stavu.



Graf 12: Pokles intenzity osvětlení u svítilek firmy Applic barvy červené Č2, Č3

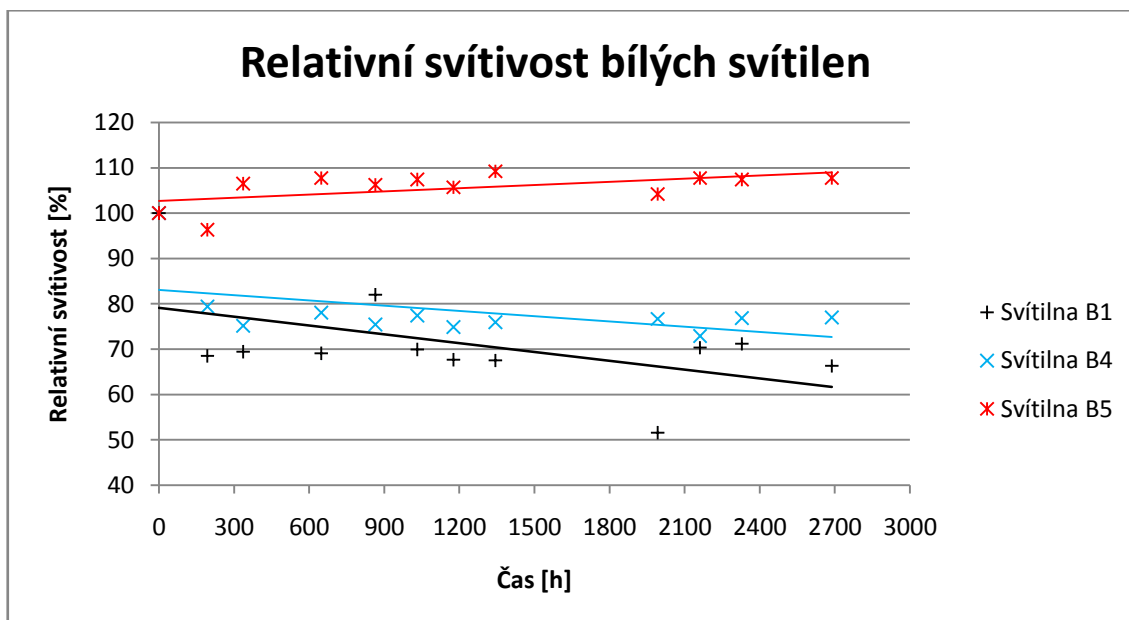


Graf 13: Pokles intenzity osvětlení u svítilek firmy Applic barvy červené Č6, Č7

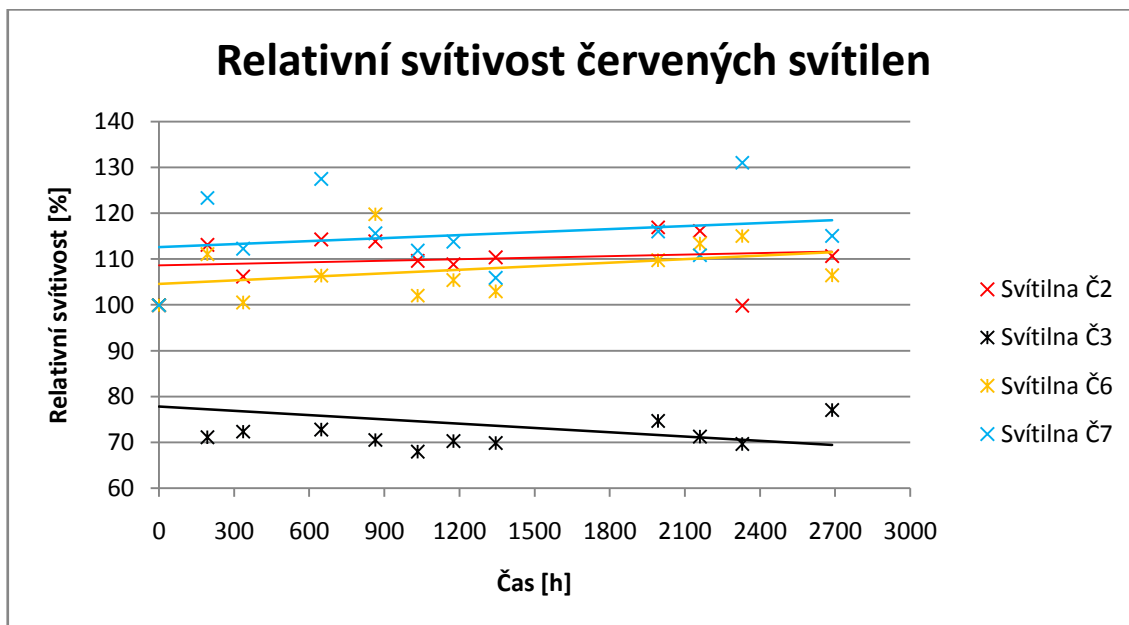
Svítidlo Č2 si zachovalo svoji intenzitu osvětlení za studeného stavu i za provozní teploty. Jinak tomu bylo u svítidly Č3, kde je vidět velký pokles oproti nezahřátému stavu, ale poté se držela na konstantní intenzitě osvětlení 2 800 lx. Jinak se chovaly svítidly Č6 a Č7, kde jejich počáteční intenzita osvětlení byla nižší než intenzita během

měření. Zajímavé je, že vykreslené spojnice trendu svítílen Č6 a Č7 jsou rovnoběžné, vzájemně posunuté o 300 lx. Lze tedy vidět, že svítilny, byť stejné konstrukce, nemají stejnou intenzitu osvětlení.

O kolik svítilny poklesly, lépe znázornují následující grafy relativní svítivosti.



Graf 14: Relativní svítivosti svítílen firmy Applic barvy bílé

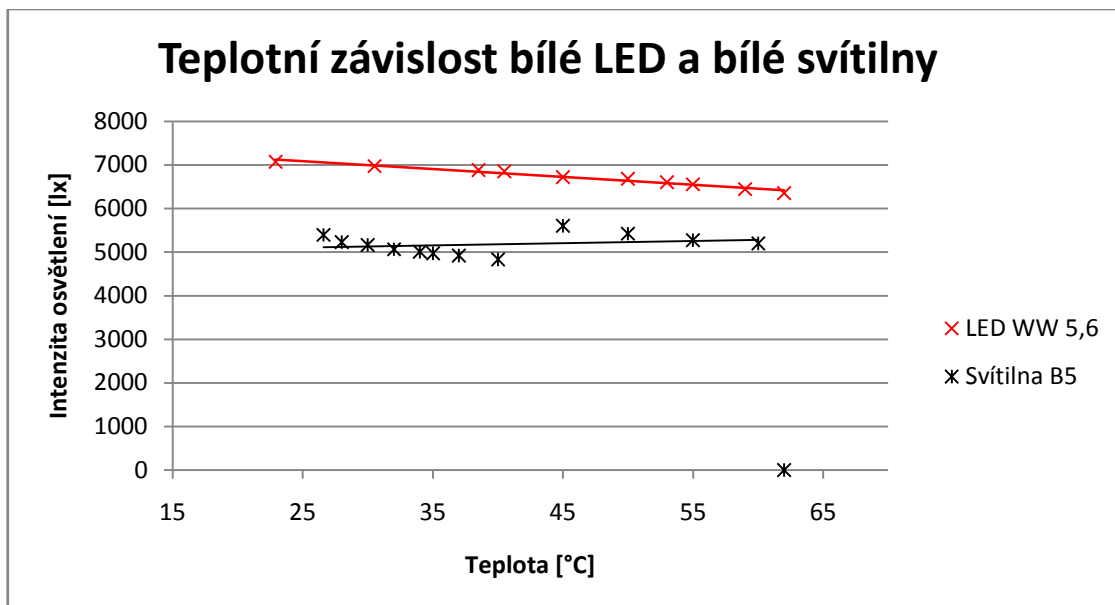


Graf 15: Relativní svítivosti svítílen firmy Applic barvy červené

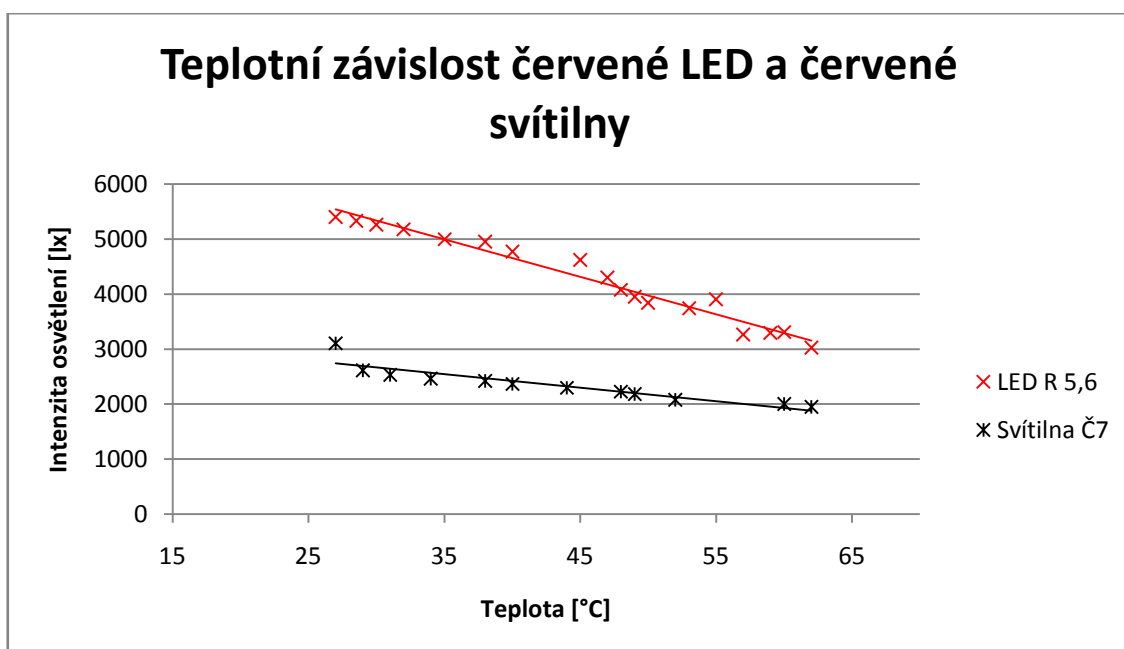
## 5.7 Teplotní závislost

Teplotní závislost byla měřena jen orientačně. Teplota byla odečítána co nejbližší k tištěnému spoji LED. Opět byla měřena svítivost pomocí luxmetru. Svítilny byly

zatěžovány trvale. Výkonové LED byly vybrány z těch, co byly zatěžovány pulzně, aby byl počet nasvícených hodin srovnatelný. Dalším kritériem pro výběr LED a svítidel byl co nejmenší naměřený pokles intenzity osvětlení po 2 700 hodinách. Teplotní závislost byla z důvodu možného zničení svítidel měřena až jako poslední.



Graf 16: Teplotní závislost bílé LED a bílé svítidly



Graf 17: Teplotní závislost červené LED a červené svítidly

Teple bílé LED č. 5 a 6 vykazovaly s rostoucí teplotou mírný pokles svítivosti. Bílá svítidlo B5 pokles nevykazovala, ovšem při teplotě 62 °C zhasla. U červené LED č.5 a 6 byl znatelný pokles svítivosti z 5 500 lx na 3 000 lx. Červená svítidlo měla pokles jen z 3 000 lx na 2 000 lx.

## Závěr

Cílem práce bylo provést analýzu životnosti a stárnutí svítivých diod. Byly zachyceny projevy stárnutí u dodaných svítílen firmy Applic a samostatných výkonových LED, a to při trvalé zátěži a v předpokládaném režimu přerušovaného svitu. Pro blikající LED byl vyvinut přípravek, který zatěžoval LED jmenovitým proudem v poměru 1:3.

Stárnutí blikajících LED bylo oproti výchozímu stavu u červené 0 % pokles, u teple bílé a zelené 5 % pokles, u oranžové 8 % pokles svítivosti. Trvale svítící LED projevovaly vyšší pokles, červená, teple bílá a zelená 10 %, naopak oranžová pouze 3 % pokles oproti výchozímu stavu. Lze usuzovat, že to je projev rozdílné provozní doby obou skupin LED. Blikající oproti trvale svítícím byly v provozu jen třetinovou dobu. Svítílny měly pokles oproti výchozímu stavu B1 37 %; B4 28 %; B5, Č2, Č6 10 %; Č3 30 % a Č7 19 %.

U svítílen firmy Applic byla řídicí elektronika upravena tak, aby bylo možné logickým signálem ovládat spínání proudu do LED. Během dlouhodobého testu bylo zjištěno, že elektronika nemá vliv na stárnutí, jen se kvůli ní snížila intenzita osvětlení výkonových LED. Vhodnou úpravou elektroniky by bylo odstranění polymerové pojistky z obvodu LED, aby nedocházelo k úbytku napětí a tím ke snížení svítivosti.

Navíc byla proměřena volt-ampérová charakteristika všech dodaných barev výkonových LED s cílem zjistit úbytky napětí na diodách. Výsledky opět potvrdily katalogové údaje.

Naměřené hodnoty, pokud započítáme nejistoty měření, odpovídají hodnotám uvedeným v katalogovém listu. Vždy byla naměřena větší svítivost než minimální deklarovaná.

Dále byla proměřena teplotní závislost svítílny a odpovídající barvy LED. Bylo zjištěno, že u svítílen s rostoucí teplotou klesá svítivost méně než u LED.

## Seznam použité literatury

- [1] *Cree* [online]. 2007 - 2008 [cit. 2011-05-12]. Katalogový list Xlamp XR-C. Dostupné z WWW: <[www.cree.com/products/pdf/XLampXR-C.pdf](http://www.cree.com/products/pdf/XLampXR-C.pdf)>.
- [2] *VSCHT* [online]. 2011 [cit. 2011-05-12]. Měření Planckovy konstanty. Dostupné z WWW: <[http://eso.vscht.cz/cache\\_data/1395/www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/uhrovah/skripta/Uloha%2014a.pdf](http://eso.vscht.cz/cache_data/1395/www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/uhrovah/skripta/Uloha%2014a.pdf)>.
- [3] *Atarion* [online]. 2008 - 2009 [cit. 2011-05-12]. Lumen versus kandela. Dostupné z WWW: <[www.led-moduly.cz/lumen-versus-kandela.html](http://www.led-moduly.cz/lumen-versus-kandela.html)>.
- [4] *OSRAM* [online]. 2011 [cit. 2011-05-12]. Kvantita. Dostupné z WWW: <[http://www.osram.cz/osram\\_cz/SVTELN\\_DESIGN/O\\_svtlo/Svtlo\\_v\\_mstnosti/Zklady\\_optiky/Kvantita/index.html](http://www.osram.cz/osram_cz/SVTELN_DESIGN/O_svtlo/Svtlo_v_mstnosti/Zklady_optiky/Kvantita/index.html)>.
- [5] *FK technics* [online]. 2011 [cit. 2011-05-12]. Candela, lumen, lux. Dostupné z WWW: <[http://www.fkt.cz/cz/clanky/teorie-a-praxe/art\\_106/candela-lumen-lux.aspx](http://www.fkt.cz/cz/clanky/teorie-a-praxe/art_106/candela-lumen-lux.aspx)>.
- [6] *Cree* [online]. 2006 - 2009 [cit. 2011-05-12]. Katalogový list Xlamp XR-E. Dostupné z WWW: <<http://www.cree.com/products/pdf/xlamp7090xr-e.pdf>>.
- [7] *4 - construction* [online]. 2011 [cit. 2011-05-14]. Světelné zdroje, světelné diody. Dostupné z WWW: <<http://www.4-construction.com/cz/clanek/svetelne-zdroje-svetelne-diody/>>.
- [8] *Elkovo Čepelík* [online]. 2011 [cit. 2011-05-14]. Teorie a podpora vzdělávání. Dostupné z WWW: <<http://www.elkovo-cepelik.cz/teorie-a-podpora-vzdelavani>>.
- [9] *Trivium z optiky* [online]. 2011 [cit. 2011-05-14]. Fotometrie. Dostupné z WWW: <<http://artemis.osu.cz/voptp/skriptum/kap06.pdf>>.
- [10] *LED osvětlení* [online]. 2009 [cit. 2011-05-14]. Trocha teorie. Dostupné z WWW: <<http://ledosvetleni.webnode.cz/news/trocha-teorie/>>.
- [11] *Power Tech* [online]. 2011 [cit. 2011-05-14]. Nejčastější dotazy k technologii LED. Dostupné z WWW: <<http://www.power-tech.cz/led-lighting-faq.php>>.
- [12] *Power Tech* [online]. 2011 [cit. 2011-05-14]. Základní pojmy. Dostupné z WWW: <<http://www.power-tech.cz/led-lighting-pojmy.php>>.



- [13] VŠB [online]. 2011 [cit. 2011-05-14]. Světlo emitující dioda, LED. Dostupné z WWW:  
<[http://homel.vsb.cz/~rep75/Predmety/Elektronika/ele2/kap2/2\\_2\\_4.html](http://homel.vsb.cz/~rep75/Predmety/Elektronika/ele2/kap2/2_2_4.html)>.
- [14] VUT [online]. 2011 [cit. 2011-05-14]. Planckův vyzařovací zákon. Dostupné z WWW: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0202.htm>>.
- [15] ŠPELDA, Antonín. *Geometrická optika Fysiologická optika Fotometrie*. Plzeň : Vyšší pedagogická škola v Plzni, 1957. 144 s.
- [16] DOLEČEK, J.: *Moderní učebnice elektroniky - 3.díl Optoelektronika*, BEN 2005, ISBN 80-7300-184-5
- [17] FROHN, M. & kol.: *Elektronika - polovodičové součástky a základní zapojení*, BEN, Praha 2006, ISBN 80-7300-123-3

## **Obsah přiloženého CD**

Bakalářská práce ve formátu .PDF, .DOCX

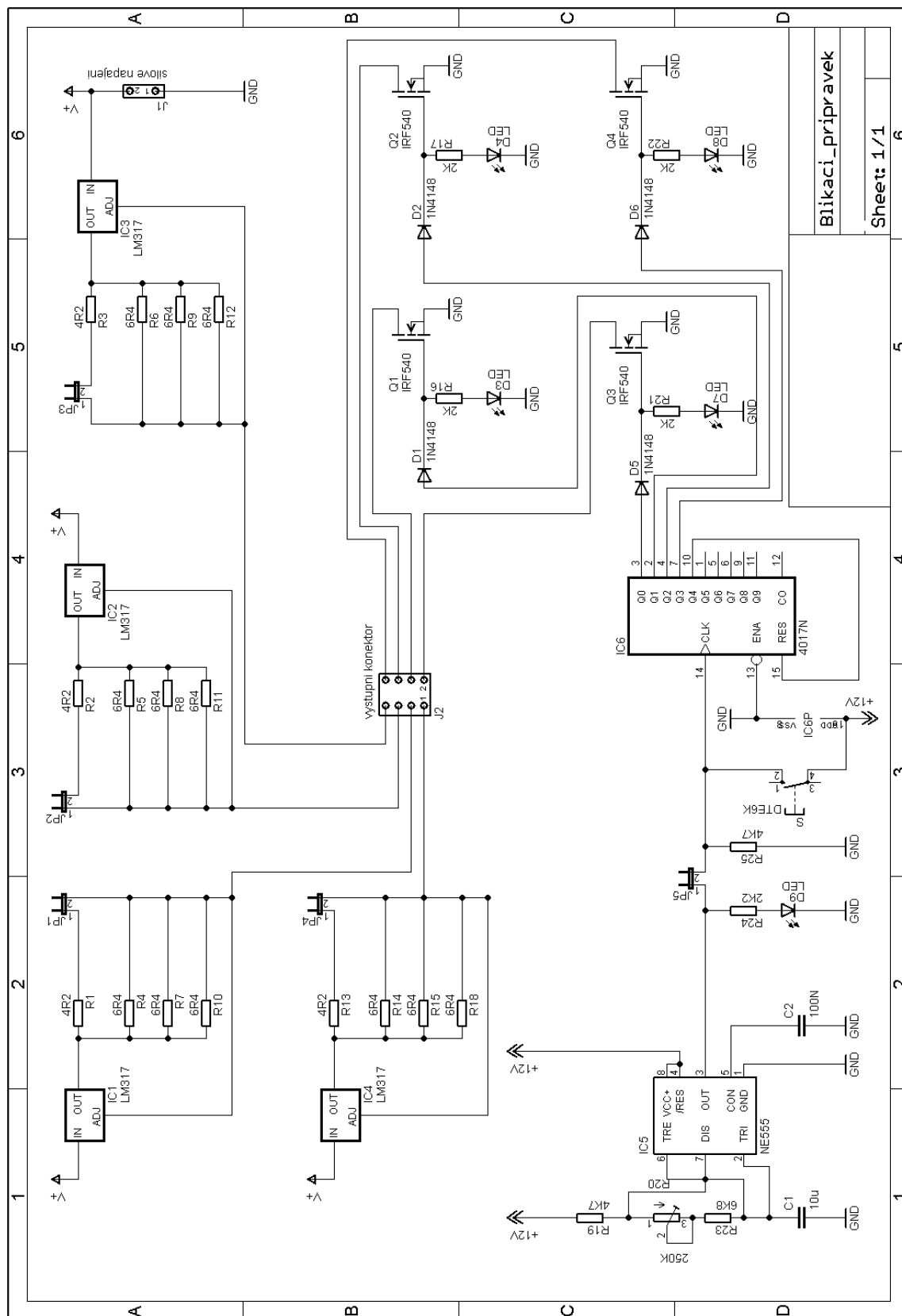
Systematická chyba ve formátu .XLSX

LED ve formátu .XLSX

Blikací přípravek ve formátu .PDF

Katalogové listy LED

## Příloha a – schéma zapojení přípravku pro pulzní zatěžování



## Příloha B – Tabulky blikajících LED

LED BLIK	číslo LED	Hodiny provozu											
		0	192	336	648	864	1032	1176	1344	1992	2160	2328	2688
TEPLÁ BÍLÁ	1	3740	3810	3770	3690	3535	3565	3540	3450	3430	3480	3450	3425
	2	3740	3810	3770	3690	3535	3565	3540	3450	3430	3480	3450	3425
	3	3945	3965	3930	3790	3855	3910	3970	3930	3910	3905	3840	3880
	4	3945	3965	3930	3790	3855	3910	3970	3930	3910	3905	3840	3880
	5	3695	3745	3680	3465	3395	3610	3620	3620	3585	3650	3620	3615
	6	3695	3745	3680	3465	3395	3610	3620	3620	3585	3650	3620	3615
	7	3895	3890	3840	3755	3760	3800	3390	3815	3790	3835	3810	3830
	8	3895	3890	3840	3755	3760	3800	3390	3815	3790	3835	3810	3830
	Lx	3819	3853	3805	3675	3636	3721	3630	3704	3679	3718	3680	3688

LED BLIK	číslo LED	Hodiny provozu											
		0	192	336	648	864	1032	1176	1344	1992	2160	2328	2688
ČERVENÁ	1	2535	2695	2485	2440	2515	2425	2570	2560	2540	2565	2555	2565
	2	2535	2695	2485	2440	2515	2425	2570	2560	2540	2565	2555	2565
	3	2405	2610	2400	2435	2350	2325	2450	2465	2430	2405	2435	2435
	4	2405	2610	2400	2435	2350	2325	2450	2465	2430	2405	2435	2435
	5	2545	1215	2575	2610	2540	2500	2610	2610	2600	2630	2560	2555
	6	2545	1215	2575	2610	2540	2500	2610	2610	2600	2630	2560	2555
	7	2315	2520	2350	2380	2255	2265	2385	2400	2370	2395	2410	2385
	8	2315	2520	2350	2380	2255	2265	2385	2400	2370	2395	2410	2385
	Lx	2450	2260	2453	2466	2415	2379	2504	2509	2485	2499	2490	2485

LED BLIK	číslo LED	Hodiny provozu											
		0	192	336	648	864	1032	1176	1344	1992	2160	2328	2688
ZELENÁ	1	2368	2432	2389	2395	2352	2342	2356	2332	2306	2297	2197	2271
	2	2319	2253	2243	2256	2243	2207	2220	2158	2117	2185	2150	2153
	3	2700	2605	2606	2658	2633	2620	2611	2605	2656	2649	2624	2603
	4	2333	2392	2345	2377	2385	2344	2367	2368	2470	2407	2467	2368
	5	2251	2248	2245	2256	2243	2224	2225	2224	2222	2205	2208	2164
	6	2187	2204	2110	2151	2164	2140	2154	2129	2127	2124	2096	2084
	7	2190	2211	2142	2212	2124	2112	2147	2141	2147	2066	2098	2132
	8	2773	2630	2596	2550	2576	2549	2557	2553	2586	2561	2525	2513
	Lx	2390	2372	2335	2357	2340	2317	2330	2314	2329	2312	2296	2286

LED BLIK	číslo LED	Hodiny provozu												
		0	192	336	648	864	1032	1176	1344	1992	2160	2328	2688	
ORANŽOVÁ	1	1962	2106	1926	2098	1950	1925	1988	1917	1915	1972	1907	1905	
	2	2280	2300	2175	2299	2189	2166	2250	2166	2186	2266	2259	2245	
	3	2113	2226	2049	2211	2050	2032	2092	2011	2009	2104	1978	1970	
	4	2311	2351	2176	2331	2216	2214	2280	2232	2250	2331	2295	2281	
	5	2104	2187	2035	2184	2067	2022	2089	1994	1991	2086	2035	2020	
	6	2832	2130	1982	2077	1925	1960	2011	1934	1933	2008	1967	1948	
	7	2251	2350	2261	2291	2274	2230	2276	2237	2182	2268	2198	2190	
	8	2309	2413	2326	2369	2333	2286	2328	2289	2256	2267	2245	2202	
	Lx	2270	2258	2116	2233	2126	2104	2164	2098	2090	2163	2111	2095	

## Příloha C – Tabulky trvale svítích LED

LED SVIT	číslo LED	Hodiny provozu											
		0	192	336	648	864	1032	1176	1344	1992	2160	2328	2688
TEPLÁ BÍLÁ	1	3685	3806	3706	3458	3314	3180	3215	3133	3142	3171	2998	3080
	2	3700	3769	3413	3345	3334	3196	3188	3188	3425	3235	3216	3099
	3	3730	3769	3665	3570	3400	3306	3299	3247	3081	3204	3122	6055
	4	3673	3724	3485	3429	3396	3350	3311	3355	3385	3368	3297	3152
	Lx	3697	3767	3567	3451	3361	3258	3253	3231	3258	3245	3158	3847

LED SVIT	číslo LED	Hodiny provozu											
		0	192	336	648	864	1032	1176	1344	1992	2160	2328	2688
ČERVENÁ	1	2352	2340	2460	2369	2302	2280	2295	2339	2156	2272	2083	2103
	2	2335	2328	2461	2339	2362	2143	2275	2322	2057	2206	2114	2077
	3	2043	2126	2186	2041	2121	2037	2055	2011	2050	2045	1983	2002
	4	2260	2342	2390	2254	2282	2100	2060	1968	1961	2023	1908	1941
	Lx	2248	2284	2374	2251	2267	2140	2171	2160	2056	2137	2022	2031

LED SVIT	číslo LED	Hodiny provozu											
		0	192	336	648	864	1032	1176	1344	1992	2160	2328	2688
ZELENÁ	1	2655	2510	2530	2504	2498	2397	2419	2397	2311	2280	2315	2302
	2	2327	2366	2252	2269	2300	2249	2248	2220	2190	2163	2135	2167
	3	2172	2039	2088	2056	2007	2033	2030	1991	1990	1991	1981	1957
	4	1972	1964	2044	2038	1991	2023	2000	2005	2016	1732	1989	1940
	Lx	2282	2220	2229	2217	2199	2176	2174	2153	2127	2042	2105	2092

LED SVIT	číslo LED	Hodiny provozu											
		0	192	336	648	864	1032	1176	1344	1992	2160	2328	2688
ORANŽOVÁ	1	1840	1829	1738	1725	1773	1720	1704	1672	1693	1671	1639	1664
	2	1760	1869	1868	1852	1899	1854	1850	1833	1706	1736	1697	1714
	3	1895	1969	2009	1828	1930	1883	1869	1858	1935	1956	1923	1919
	4	1700	1867	1830	1855	1909	1879	1830	1836	1668	1703	1689	1707
	Lx	1799	1884	1861	1815	1878	1834	1813	1800	1751	1767	1737	1751

## Příloha D – Tabulka teplotní závislosti

TEPLÁ	E [lx]	0	7070	6980	6880	6850	6720	6680	6600	6560	6450	6350
BÍLÁ LED	T [°C]	22,1	22,9	30,5	38,5	40,5	45	50	53	55	59	62
ČERVENÁ	E [lx]	0	5400	5330	5260	4770	4300	3840	3740	3904	3293	3023
	T [°C]	26,8	27	28,5	30	40	47	50	53	55	59	62
BÍLÁ	E [lx]	0	5400	5230	5160	4920	4830	5600	5430	5270	5200	0
SVÍTILNA	T [°C]	26,3	26,6	28	30	37	40	45	50	55	60	62
ČERVENÁ	E [lx]	0	3109	2612	2532	2420	2370	2300	2230	2075	2000	1950
SVÍTILNA	T [°C]	26,7	27	29	31	38	40	44	48	52	60	62

## Příloha E – Tabulky volt-ampérové charakteristiky

ČERVENÁ	LED 1			LED 2		
I [mA]	U1[V]	E1 [lx]	F1 [lm]	U2 [V]	E2 [lux]	F2 [lm]
0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
50	1,81	237	5,79	1,82	210	5,10
100	1,87	500	12,21	1,88	470	11,47
150	1,91	739	18,04	1,93	712	17,38
200	1,94	962	23,48	1,97	957	23,36
250	1,97	1 202	29,34	2,00	1 181	28,83
300	2,00	1 410	34,42	2,03	1 402	34,23
350	2,02	1 552	37,89	2,06	1 607	39,23
400	2,05	1 782	43,50	2,09	1 792	43,75
450	2,07	1 941	47,38	2,11	1 958	47,80
500	2,08	2 082	50,83	2,12	2 118	51,70
550	2,09	2 230	54,44	2,14	2 242	54,73
600	2,11	2 290	55,90	2,16	2 350	57,37
650	2,13	2 461	60,08	2,17	2 461	60,08
700	2,14	2 548	62,20	2,19	2 544	62,10

ORANŽOVÁ	LED 1			LED 2		
I [mA]	U1[V]	E1 [lx]	F1 [lm]	U2 [V]	E2 [lux]	F2 [lm]
0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
50	1,82	156	7,35	1,89	151	7,10
100	1,88	335	15,72	1,85	321	15,10
150	1,93	531	24,95	1,89	511	24,01
200	1,98	700	32,89	1,92	679	31,91
250	2,00	889	41,78	1,96	846	39,75
300	2,05	1 066	50,09	1,99	1 019	47,88
350	2,08	1 227	57,66	2,02	1 173	55,12
400	2,11	1 380	64,85	2,03	1 321	62,08
450	2,13	1 523	71,57	2,06	1 472	69,17
500	2,15	1 658	77,91	2,09	1 603	75,33
550	2,17	1 785	83,88	2,11	1 731	81,34
600	2,19	1 883	88,49	2,13	1 837	86,32
650	2,21	1 925	90,46	2,14	1 939	91,12
700	2,22	2 010	94,45	2,16	2 025	95,16

N. BÍLÁ	LED 1			LED 2		
I [mA]	U1[V]	E1 [lx]	F1 [lm]	U2 [V]	E2 [lux]	F2 [lm]
0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
50	2,83	552	15,50	2,64	544	15,27
100	2,95	1 103	30,97	2,87	1 100	30,88
150	3,02	1 576	44,25	2,93	1 612	45,26
200	3,09	2 038	57,22	2,98	2 051	57,58
250	3,13	2 436	68,39	3,02	2 447	68,70
300	3,18	2 910	81,70	3,07	2 951	82,85
350	3,21	3 280	92,09	3,09	3 340	93,77
400	3,24	3 626	101,80	3,12	3 726	104,61
450	3,27	4 020	112,86	3,14	4 120	115,67
500	3,29	4 320	121,29	3,16	4 450	124,94

CHL. BÍLÁ	LED 1			LED 2		
I [mA]	U1[V]	E1 [lx]	F1 [lm]	U2 [V]	E2 [lux]	F2 [lm]
0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
50	2,64	671	18,84	2,78	513	14,40
100	2,84	1 346	37,79	2,82	1 056	29,65
150	2,90	1 953	54,83	2,89	1 600	44,92
200	2,93	2 472	69,40	2,93	2 039	57,25
250	2,97	2 953	82,91	2,97	2 357	66,17
300	3,01	3 510	98,55	3,02	2 832	79,51
350	3,03	4 140	116,23	3,03	3 246	91,13
400	3,05	4 620	129,71	3,06	3 604	101,18
450	3,07	5 040	141,50	3,07	3 880	108,93
500	3,09	5 400	151,61	3,09	4 310	121,01

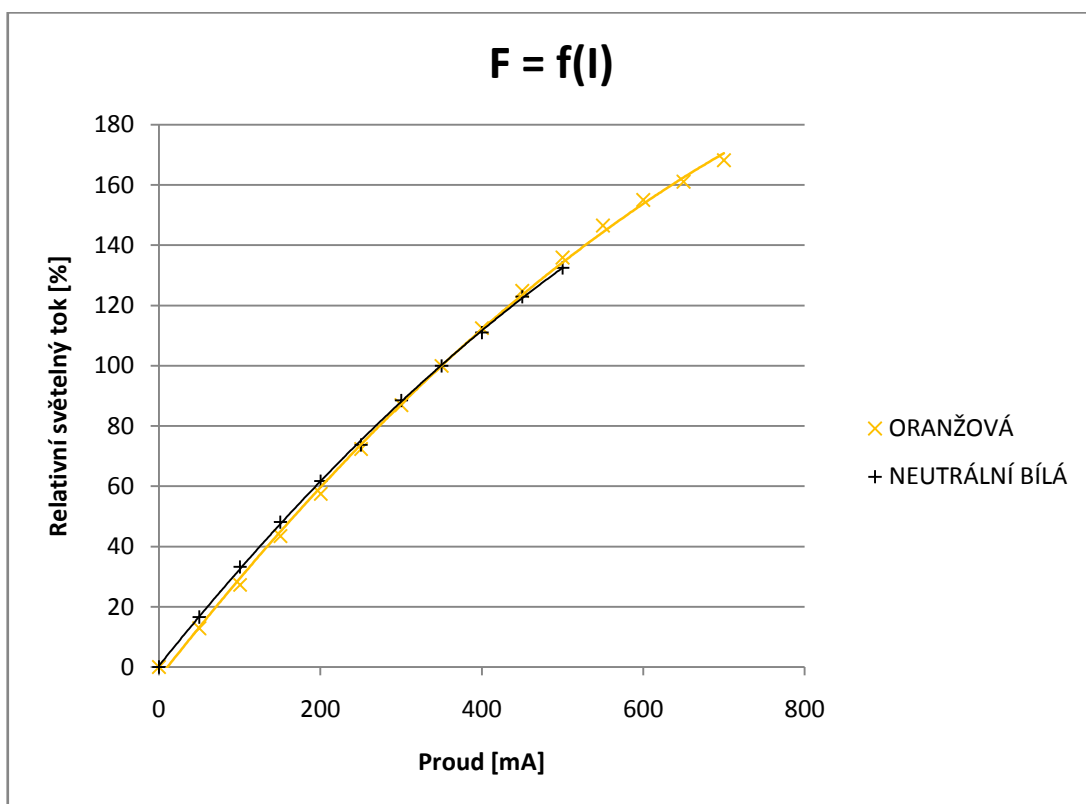
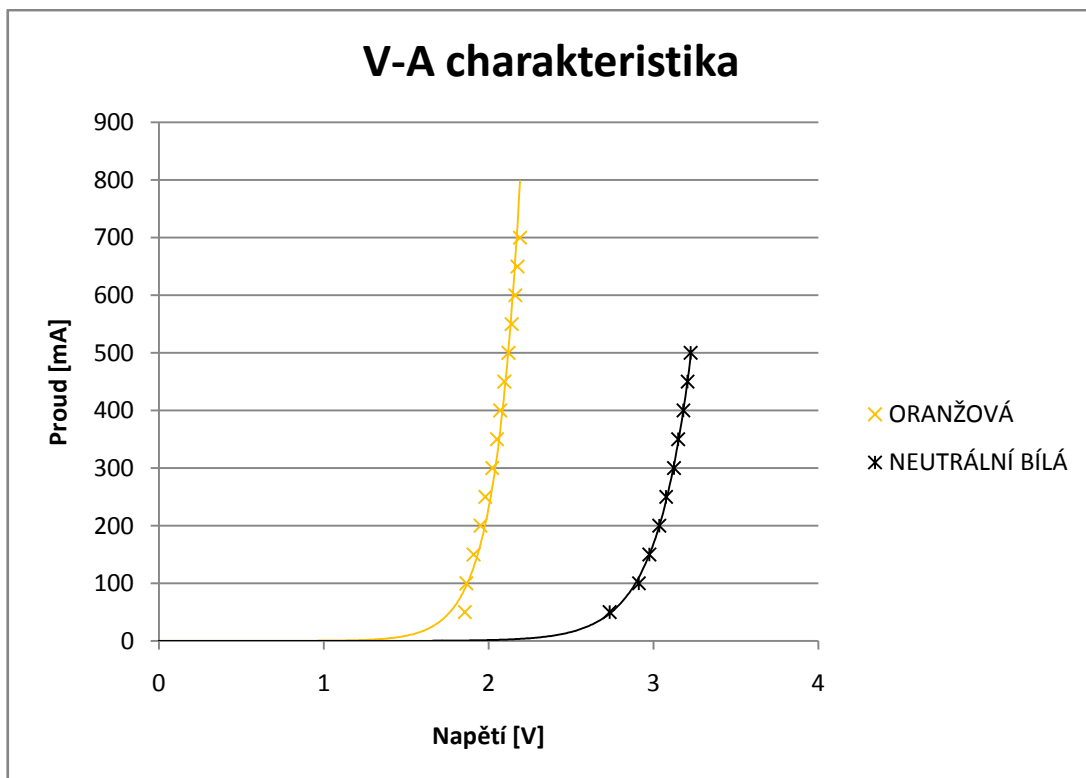
ROYAL B.	LED 1			LED 2		
I [mA]	U1[V]	E1 [lx]	F1 [lm]	U2 [V]	E2 [lux]	F2 [lm]
0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
50	2,91	16	0,75	2,44	15	0,70
100	2,98	29	1,38	2,97	31	1,46
150	3,07	44	2,05	3,05	48	2,26
200	3,16	57	2,66	3,12	62	2,93
250	3,23	67	3,13	3,19	75	3,52
300	3,32	81	3,81	3,26	92	4,31
350	3,38	94	4,43	3,30	106	4,99
400	3,46	106	4,96	3,39	119	5,57
450	3,52	115	5,42	3,45	129	6,07
500	3,59	122	5,74	3,50	143	6,72

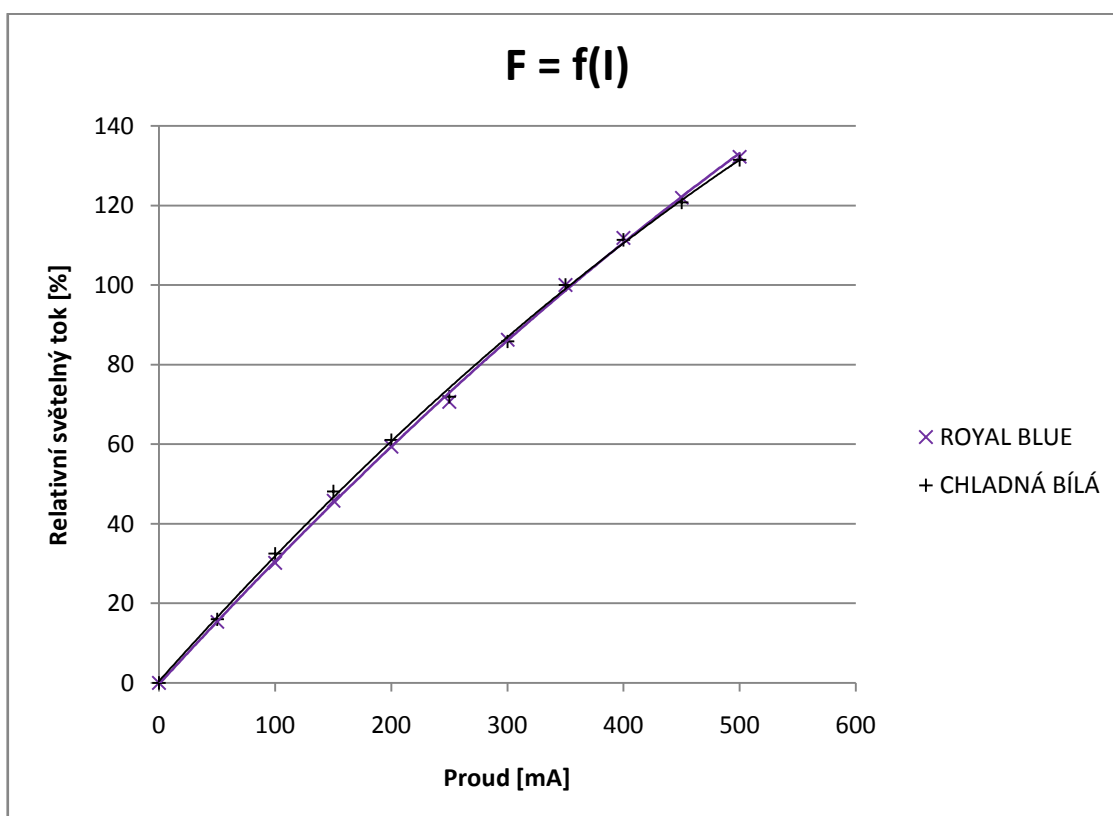
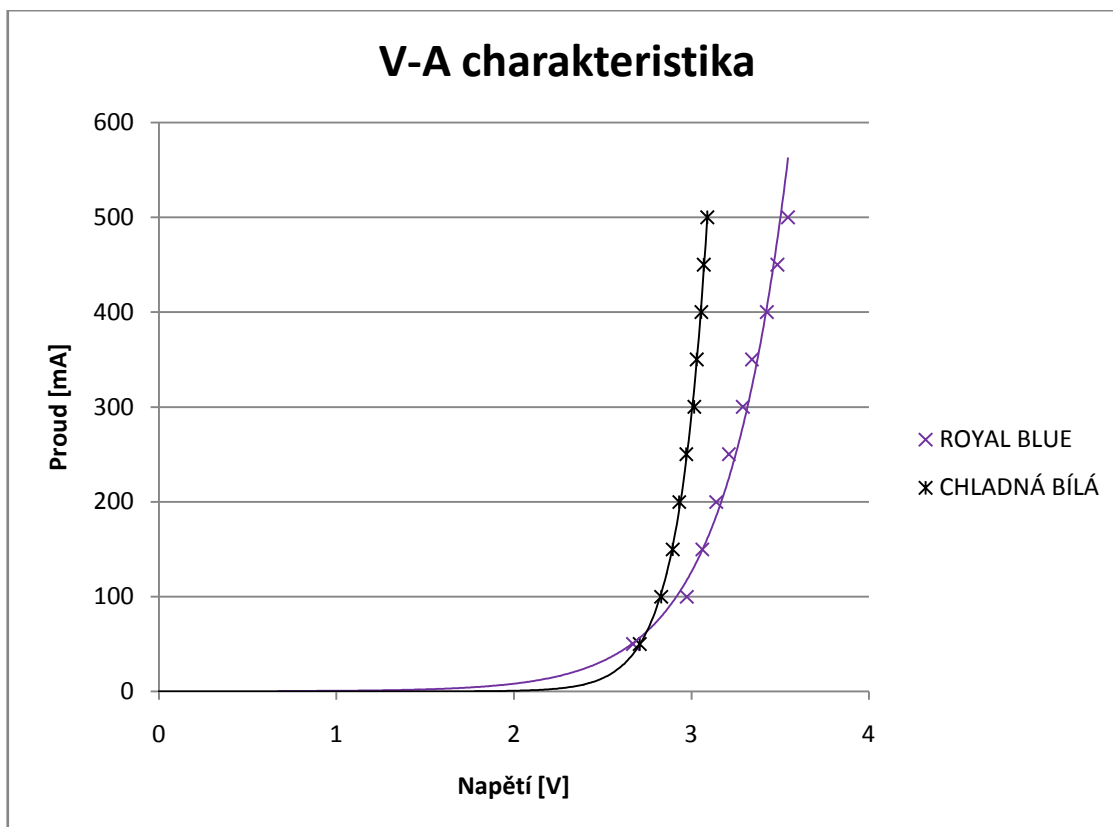
MODRÁ	LED 1			LED 2		
I [mA]	U1[V]	E1 [lx]	F1 [lm]	U2 [V]	E2 [lux]	F2 [lm]
0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
50	2,47	33	1,55	2,89	35	1,64
100	2,97	66	3,10	2,98	60	2,84
150	3,08	93	4,38	3,08	84	3,93
200	3,16	118	5,52	3,17	106	4,99
250	3,23	137	6,45	3,24	125	5,88
300	3,32	162	7,59	3,33	146	6,87
350	3,39	183	8,61	3,39	166	7,82
400	3,46	201	9,43	3,47	186	8,76
450	3,52	210	9,88	3,54	201	9,44
500	3,59	211	9,93	3,61	220	10,32

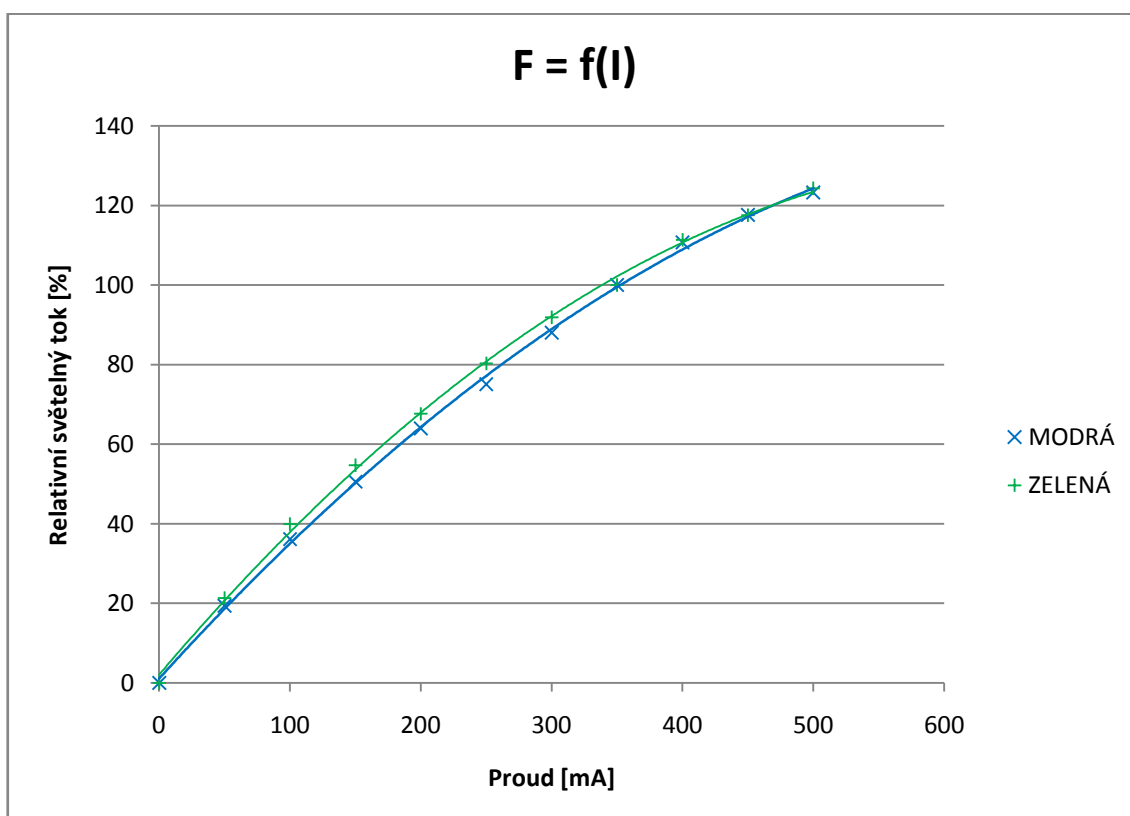
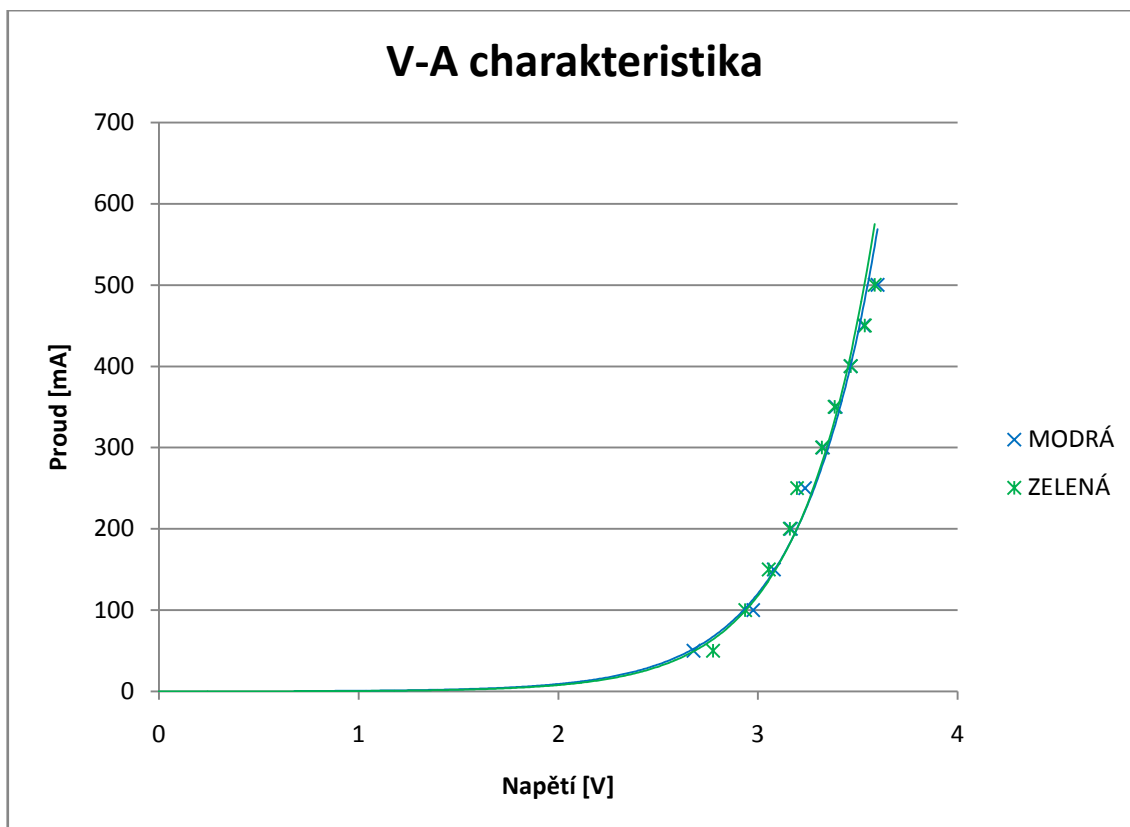
ZELENÁ	LED 1			LED 2		
I [mA]	U1[V]	E1 [lx]	F1 [lm]	U2 [V]	E2 [lux]	F2 [lm]
0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00
50	2,69	440	20,68	2,86	409	19,22
100	2,82	824	38,72	3,05	762	35,81
150	2,93	1 130	53,10	3,18	1 045	49,11
200	3,02	1 384	65,04	3,30	1 304	61,28
250	3,09	1 639	77,02	3,30	1 552	72,93
300	3,16	1 880	88,34	3,48	1 773	83,32
350	3,22	2 023	95,06	3,55	1 952	91,73
400	3,28	2 253	105,87	3,65	2 122	102,07
450	3,34	2 400	112,78	3,73	2 272	106,77
500	3,39	2 570	120,77	3,78	2 371	111,42



## Příloha F – Grafy V-A charakteristiky a $F = f(I)$







## Příloha G – Tolerance luxmetru firmy Lutron LX 1108

Range	In-range display	Resolution	Accuracy
40.00 Lux	0-40.00 Lux	0.01 Lux	±(3% rdg + 0.5% FS)
400.0 Lux	25.0-400.0 Lux	0.1 Lux	
4,000 Lux	250-4,000 Lux	1 Lux	
40,000 Lux	2,500-40,000 Lux	10 Lux	
400,000 Lux	25,000-400,000 Lux	100 Lux	<100,000 Lux: ±(3% rdg + 0.5 FS) >100,000 Lux: @ for reference only
4,000 Fc	0-3,720 Fc	0.001 Fc	±(3% rdg + 0.5% FS)
40.00 Fc	2.32-37.20 Fc	0.01 Fc	
400.0 Fc	23.2-372.0 Fc	0.1 Fc	
4,000 Fc	232-3,720 Fc	1 Fc	
40,000 Fc	2,320-40,000 Fc	10 Fc	<9,300 Fc: ±(3% rdg + 0.5 FS) >9,300 Fc: @ for reference only

Accuracy tested by a standard parallel light tungsten lamp of 2856 K degree temperature